Niederfrequenz-Verstärker mit Röhren und Transistoren

Von

INGENIEUR FRITZ KÜHNE

Mit 100 Bildern und 13 Tabellen

**13., stark erweiterte Auflage des Buches
Vielseitige Verstärkergeräte
für Tonaufnahme und Wiedergabe**

FRANZIS-VERLAG MÜNCHEN

Nr. 7/8 der RADIO-PRAKTIKER-BÜCHEREI

Cellu-Band

Das Umschlagbild zeigt einen Hi-Fi-Transistorverstärker von Siemens

1970

Franzis-Verlag G. Emil Mayer KG

Sämtliche Rechte – besonders das Übersetzungsrecht – an Text und Bildern vorbehalten. Fotomechanische Vervielfältigung nur mit Genehmigung des Verlages. Jeder Nachdruck, auch auszugsweise, und jede Wiedergabe der Bilder, auch in verändertem Zustand, sind verboten.

Druck: G. Franz'sche Buchdruckerei G. Emil Mayer, München 37, Karlstraße 35
Printed in Germany. Imprimé en Allemagne.

Vorwort

Im Jahr 1950 erschien die erste Auflage von Band 8 der Radio-Praktiker-Bücherei unter dem Titel „Vielseitige Verstärkergeräte für Tonaufnahme und Wiedergabe." Mit elf Auflagen, die immer wieder auf den letzten Stand gebracht wurden, erreichte dieses Buch die ungewöhnlich hohe Absatzziffer von rund 63 000 Exemplaren. Damit bewies es das große Interesse der Praktiker an bewährten und erprobten Nf-Verstärkerschaltungen.

Heute gilt noch immer das, was damals der ersten Auflage voranstand: „Wer sich mit der Verstärkerpraxis befaßt und vielleicht einen schadhaften Fotozellenverstärker wieder in Ordnung bringen muß, der möchte sich rasch über dessen Besonderheiten unterrichten. Hierfür will dieses Buch die erforderlichen Unterlagen liefern und noch zusätzliche Anregungen für den Selbstbau geben."

Neu sind die zahlreichen Transistorschaltungen, die zwar häufig aber doch nicht immer das Gesicht der modernen Verstärkertechnik bestimmen, die aber eine erhebliche Umfangserweiterung erforderlich machten. Das Buch möchte auch auf diesem Teilgebiet ausreichende Hinweise für die Praxis und Anregungen für eigene Entwürfe vermitteln.

Garmisch-Partenkirchen
und München

Fritz Kühne

Inhalt

1 Verstärker für die Tonaufnahme und -wiedergabe 7
1.1 Die wichtigsten Eigenschaften von Verstärkern 9
1.2 Sprechleistung, Eingangsempfindlichkeit und Verstärkungsziffer 10
1.3 Der Klirrfaktor 11
1.4 Die Dynamik 11
1.5 Lineare Verzerrungen, Frequenzkurve 12
1.6 Intermodulation 13
1.7 Das Auswerten von Verstärkerdaten 13

2 Bestückungsfragen 16
2.1 Ein- oder Mehrgitterröhren? 16
2.2 ... oder Transistoren? 22

3 Verstärker-Bausteine 24
3.1 Mikrofonverstärker 24
3.2 Fotozellenverstärker 29
3.3 Lautstärke-Ferneinstellung mit Fotowiderständen ... 35
3.4 Tonabnehmerverstärker 40
3.5 Magnettonverstärker 44
3.6 Summen- und Trennverstärker 53
3.7 Dynamikbegrenzer 59
3.8 Hallverstärker 62
3.9 Mischpulte und Steuergeräte 66
3.10 Lautsprecherverstärker 80
3.11 Schreiberverstärker für die Schallfolien-Aufnahme .. 84
3.12 Die Klangeinstellung 87

4 Erprobte Verstärkerschaltungen 96
4.1 Transistor-B-Verstärker mit 6,5 oder 10 Watt Sprechleistung 96
4.2 Netzgespeister 2-Watt-Transistorverstärker 99

4.3 Eisenloser Transistor-Endverstärker mit 16 Watt Sprechleistung 100
4.4 Eisenloser Stereo-Transistorverstärker mit 2 x 12 Watt Sprechleistung 102
4.5 Eisenloser Transistorverstärker mit Komplementär-Endstufe 105
4.6 Röhren-Mischverstärker ZV 28 für den Selbstbau 107
4.7 Zwei-Röhren-Verstärker mit 8 Watt Sprechleistung .. 116
4.8 Zwei-Kanal-Röhrenverstärker mit 15 + 5 Watt Sprechleistung 116
4.9 40-Watt-Röhrenverstärker mit niedriger Anodenspannung 117

5 Praktischer Verstärkerbau 127
5.1 Sorgen mit der Gegenkopplung 127
5.2 Chassis- und Gehäusekonstruktionen 131
5.3 Gedruckte Schaltung oder konventionelle Verdrahtung? 134

Sachverzeichnis 138

Tabellenanhang 140

1 Verstärker für die Tonaufnahme und -wiedergabe

Der Verfasser von praxisnahen Büchern über die Niederfrequenzverstärker-Technik steht in den letzten Jahren vor immer größeren Schwierigkeiten. Seine Leser erwarten rezeptartige Schaltungen, die praktisch erprobt sind. Sie übersehen aber, daß das Erproben heute keine „Feierabendbeschäftigung" mehr ist, sondern beinahe eine „Lebensaufgabe". Der Grund hierfür ist die ungewöhnlich schnell voranschreitende Technik, die ständig neue Röhren und Transistoren auf den Markt bringt und die es nahezu nicht mehr zuläßt, auf begrenztem Raum alle Vor- und Zwischenstufen der Entwicklung lückenlos zu schildern.

Bei Licht besehen ist das aber kein Unglück, was wir an einigen praktischen Beispielen beweisen wollen: Schon vor dreißig Jahren konnte man ordentliche und hochwertige Nf-Verstärker bauen, nur man benutzte dazu das Material und etwa diejenigen Röhren, die gerade damals auf dem Markt waren. Immerhin kam es nicht so sehr auf die Bauelemente an, um etwas Besonderes zu schaffen, sondern viel mehr auf das „Gewußt-Wie", also auf das richtige Zusammenbauen des Erhältlichen. Schon damals entstanden Nf-Verstärker mit Merkmalen, die sich auch heute noch sehen lassen können. Kurzum, man wußte recht gut, was verlangt wird und wie man auch hochgeschraubte Ansprüche befriedigen kann.

Manche recht moderne Verstärkerschaltung wurde zum ersten Mal mit Röhren der 40er-Reihe (z. B. ECC 40) erprobt und in vielen Exemplaren erfolgreich nachgebaut. Argwöhnische Leser meinten nun, so etwas sei „völlig veraltet", weil inzwischen die Röhren der 80er Serie aufkamen. Manchmal war es recht schwer, ihnen zu beweisen, daß die Schaltung selbst immer noch hochmodern ist, daß sich die 40er-Bestückung noch immer verantworten läßt und daß es im Übrigen bei ihnen selbst liegt, daß sie

statt 40er-Röhren Äquivalenztypen der 80er-Reihe verwenden, wenn das ihr „fortschrittliches Gewissen" beruhigt. Im Prinzip ändert das am Konzept der Schaltung überhaupt nichts, und ein Entwurf, der z. B. 1945 vernünftig und gescheit war, wird weder besser noch schlechter, wenn man ihn mit Röhren der 60er Jahre oder mit gleich guten Transistoren verwirklicht. Denn: Wie man Verstärker baut, ist seit langem bekannt.

Diese Überlegungen erstrecken sich sogar auf Transistorschaltungen, und wir gehen darauf noch ausführlicher in Abschnitt 2 ein. Ganz grundsätzlich müssen wir uns aber zuvor mit einigen Dingen befassen, die alle Nf-Verstärker betreffen, gleichgültig, ob sie mit vergleichsweise „vorsintflutlichen" US-Röhren, mit deutschen 40er-, 80er- oder 90er-Röhren oder schon mit Transistoren bestückt sind.

Wenn man versucht, die vielen Arten von Tonfrequenzverstärkern in Gruppen einzuteilen und dann nach einem Ausdruck sucht, der unmißverständlich etwas über den Verwendungszweck aussagt, merkt man bald, daß das gar nicht so einfach ist. Eine Einstufung nach Verstärkungsziffer, Sprechleistung oder Stufenzahl scheint zunächst naheliegend, aber sie sagt nichts über den Verwendungszweck aus.

Im kommerziellen Betrieb teilt man die Verstärker vielfach in drei Gruppen ein, nämlich in Quell-, Übertragungs- und Verbraucherverstärker.

Die Quellverstärker sind besonders für den Anschluß an eine bestimmte Tonfrequenzquelle ausgelegt, zum Beispiel an einen Tonabnehmer oder ein Mikrofon.

Die Übertragungsverstärker sollen nur eine bestimmte Verstärkungsziffer bringen, oder sie dienen auch nur zur Trennung verschiedener Verstärkerkanäle.

Die Verbraucherverstärker sind auf die Eigenschaften bestimmter Verbraucher, zum Beispiel die von Lautsprechern, Tonschreibern und dergleichen, ausgelegt.

Diese Klassifizierung ist für größere Anlagen sehr zweckmäßig. Dort werden nämlich, bedingt durch die vielfach wechselnden Übertragungsaufträge, ganze „Verstärkerstraßen" für Sonderzwecke dadurch gebildet, daß man durch Zusammenklinken der jeweils geeigneten Spezialverstärker den richtigen „Verstär-

kersatz" in „Bausteinmanier" zusammenfügt. Diese Arbeitsweise bietet viele Vorteile, und zwar auch für den Praktiker beim Selbstbau der Geräte. Eine so zusammengeschaltete Anlage besteht allerdings immer aus mehreren „Kästen", aber sie läßt sich dafür jederzeit organisch erweitern, und sie kann niemals als Ganzes veralten.

Trotzdem wird für einfachere Ansprüche vielfach der „Komplett"- oder „Vollverstärker" vorgezogen. In einem einzigen Gehäuse sind hier Quell-, Übertragungs- und Verbraucherverstärker vereint, und schon deshalb ist es schwierig, einen solchen Verstärker in der oben genannten Form treffend zu klassifizieren.

Es käme nämlich ganz darauf an, von welcher Seite aus man den Verstärker betrachten würde. Von der Eingangsseite aus könnte man dann vielleicht von einem Quellverstärker sprechen, weil als Tonfrequenzquelle ein Mikrofon vorgesehen ist, und von der Ausgangsseite her hätte man einen Verbraucherverstärker vor sich, weil ein Lautsprecher angeschlossen werden soll. Deshalb ist es für die Alltagspraxis zweckmäßiger, ganz allgemein eine lose Einteilung zu treffen nach Verstärkern für „Tonaufnahme" und „-wiedergabe". Dabei soll dann der Begriff „Tonaufnahme" aber nicht mit „Tonaufzeichnung" verwechselt werden. Unter *Tonaufnahme* wollen wir hier zur Vereinfachung die Umwandlung von natürlichem Schall oder die Umwandlung von Tonschrift in Tonfrequenz (d. s. tonfrequente elektrische Wechselspannungen) verstehen, unter *Wiedergabe* dagegen die Rückverwandlung von Tonfrequenz in Schall, oder auch die Rückverwandlung in Bewegung, Licht oder Magnetismus zum Zwecke der Schallaufzeichnung.

Zugegeben, diese Einteilung ist nicht wissenschaftlich exakt, aber für die Zwecke des Praktikers ist sie einfach und praktisch.

1.1 Die wichtigsten Eigenschaften von Verstärkern

Nicht nur beim Laien, sondern mitunter auch beim Fachmann findet man die irrige Meinung vertreten, die Eigenschaften eines Verstärkers seien schon hinreichend durch Nennung *eines* Faktors, zum Beispiel der Sprechleistung, charakterisiert. So klar liegen aber die Verhältnisse durchaus nicht. Ein ganz einfaches Beispiel mag dies verdeutlichen: Wer viel mit der Erstellung

von Verstärkeranlagen zu tun hat, bekommt mit der Zeit ein gewisses Gefühl dafür, wieviel „Lärm" zum Beispiel ein 25-Watt-Verstärker hervorbringt. Mit anderen Worten: Er kann so ungefähr beurteilen, welchen Raum er mit einem solchen Verstärker ausreichend beschallen kann. Nun ändern sich diese Verhältnisse aber sofort, wenn zum Beispiel andere Lautsprecher verwendet werden, die einen schlechteren oder besseren Wirkungsgrad haben als die sonst benutzten. Wird als Tonfrequenzquelle ein besonders hochwertiges — und daher auch unempfindliches — Mikrofon angeschlossen, dann ist es denkbar, daß dieses ohne eine zusätzliche Vorverstärkung gar nicht in der Lage wäre, den vorhandenen Verstärker so weit auszusteuern, daß tatsächlich 25 Watt Sprechleistung erzielbar sind. Man müßte also mindestens noch die Eingangsspannung kennen, die erforderlich ist, um den Verstärker voll auszusteuern. Mit diesen beiden Zahlen kann der Praktiker tatsächlich schon etwas anfangen. Für die heutigen hochwertigen Anforderungen genügen sie aber noch nicht. Es ist vielmehr notwendig, daß man sich wenigstens mit den wichtigsten Begriffen vertraut macht, die die Eigenschaften eines Verstärkers charakterisieren.

1.2 Sprechleistung, Eingangsempfindlichkeit und Verstärkungsziffer

Diese drei Begriffe hängen eng zusammen. Die Verstärkungsziffer sagt aus, um welchen Faktor die Eingangsspannung im Verstärker vervielfacht wird, wenn der Lautstärkeregler voll aufgedreht ist. Man unterscheidet dabei zwischen einer ideellen und einer reellen Verstärkung. Die ideelle Verstärkung bezieht sich auf die Spannungsverhältnisse zwischen Gitter und Null der ersten Stufe und Anode und Null der letzten Stufe, die reelle Verstärkung dagegen auf die Spannungsverhältnisse zwischen Eingangs- und Ausgangsklemmen. Diese Spannungsverhältnisse sind dann unterschiedlich, wenn am Eingang oder Ausgang, oder an beiden, Aufwärts- oder Abwärtsübertrager vorgesehen sind.

Bei Leistungsverstärkern gibt die „Sprechleistung" diejenige tonfrequente Nutzleistung an, die bei Inkaufnahme eines bestimmten Klirrfaktors bei Vollaussteuerung und richtiger Anpassung dem Verstärker entnommen werden kann.

Die Eingangsempfindlichkeit ist diejenige Steuerspannung, die bei voll aufgedrehtem Lautstärkeregler am Eingang erforderlich ist, um die volle Sprechleistung zu erzielen.

1.3 Der Klirrfaktor

Jedem Verstärker haftet die Gefahr an, daß er in eine Übertragung Verzerrungen hineinbringt. Am unangenehmsten sind die sogenannten „nichtlinearen" Verzerrungen. Durch diese werden im Verstärker ursprünglich nicht vorhandene Obertöne gebildet. Diese unerwünschten Obertöne werden in Prozenten gemessen. Sie entstehen nicht nur bei falscher Einstellung des Arbeitspunktes der Röhren, sondern auch dann, wenn eine Röhre übersteuert wird. Bei Endröhren können zum Beispiel die in den Röhrenlisten angegebenen Sprechleistungen noch überschritten werden, aber dann würde der Klirrfaktor so stark ansteigen, daß er für das Ohr unerträglich wäre. Deshalb hat es sich eingebürgert, die Endleistung eines Verstärkers unter Inkaufnahme eines Klirrfaktors anzugeben, der für das Ohr noch kaum wahrnehmbar ist. Lange Zeit gab man die Sprechleistung von End-Trioden bei einem Klirrfaktor von 5 % und die von Pentoden bei einem Klirrfaktor von 10 % an. In letzter Zeit führt es sich ein, die Klirrfaktoren für verschiedene Endleistungen (verschieden hohe Aussteuerung) bei mehreren Frequenzen zu nennen. Die Angaben für einen modernen 80-Watt-Industrieverstärker können z. B. lauten: Klirrfaktor für 50 Hz und 1 W = 0,3 %, 40 W = 1 %, 80 W = 5 %; für 1000 Hz und 1 W = 0,1 %, 40 W = 0,3 %, 80 W = 2 %.

1.4 Die Dynamik

Unter „Dynamik" versteht man das Verhältnis von Störgeräusch zu höchster unverzerrter Lautstärke, gemessen am Verstärkerausgang. Jeder Verstärker hat unerwünschte Eigengeräusche, die von nicht vollkommener Siebung, von unvermeidbaren Einstreuungen sowie vom Röhren- und Widerstandsrauschen herrühren. Je nach dem konstruktiven Aufwand, den man beim Entwurf des Verstärkers zuließ, und je nach dem Geschick des betreffenden Konstrukteurs wird dieses Verhältnis möglichst günstig gewählt. Die Dynamik eines Verstärkers ist also ein sehr

wichtiges Kriterium. Wenn zum Beispiel am Ausgang eines Kraftverstärkers maximal 100 Volt Ausgangsspannung bei einer Störspannung von 0,5 Volt zur Verfügung stehen, dann ist das Nutz-Störspannungsverhältnis, also die Dynamik, 1 : 200. Man kann auch sagen, die Störspannung beträgt 0,5 %, oder die Dynamik ist 5,3 Np (Neper) bzw. 46 dB (Dezibel).

1.5 Lineare Verzerrungen, Frequenzkurve

Lineare Verzerrungen treten ein, wenn bestimmte Frequenzen besser oder schlechter übertragen bzw. verstärkt werden als die übrigen. Diese Erscheinung ist besonders bei den tiefsten und höchsten Tönen zu beobachten. Zumeist sinkt bei einfachen Verstärkern die Verstärkung bei den Bässen und Höhen gegenüber der Mittellage etwas ab, es sei denn, es sind besondere Maßnahmen getroffen, die das verhindern. Nun sind die Begriffe „tiefste" und „höchste" Töne nicht exakt genug, man muß da schon eine genauere Angabe machen. Deshalb sagt man zum Beispiel: Gleichmäßige Verstärkung zwischen 50 und 10 000 Hz und Abweichung bei 50 und 10 000 Hz um 30 % bzw. 0,27 Np. Aber auch das ist noch nicht ganz exakt, denn man weiß dann immer noch nicht, um wieviel die Verstärkung bei vielleicht 70 oder 12 000 Hz zurückgegangen ist. Deshalb trägt man die Verstärkung in Form einer sogenannten Frequenzkurve in ein Koor-

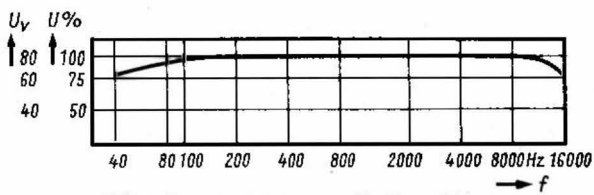


Bild 1. Frequenzkurve eines Kraftverstärkers

dinatensystem (**Bild 1**) ein. Auf der waagerechten Achse sind die Frequenzen und auf der senkrechten Achse die Ausgangsspannungen aufgetragen. An Stelle von Spannungen sind senkrecht mitunter auch Prozentzahlen oder die logarithmischen Maße dB (Dezibel) oder Np (Neper) angeführt. Als Normal- oder Vergleichsfrequenz wird eine Frequenz von 800 oder 1000 Hz an-

genommen. Man bezieht also alle Vergleiche auf die Spannung bei dieser Frequenz. Manchmal sind die Kurven gleich so gezeichnet, daß dieser Vergleich sehr leicht ist. Dann wird in der senkrechten Achse die bei 800 oder 1000 Hz gemessene Spannung als „Null" oder als „100 %" angenommen und die Abweichung nach oben oder unten ist schon fertig ausgerechnet. Auf alle Fälle erlaubt aber die Frequenzkurve eine ausgezeichnete Beurteilung der klanglichen Qualität eines Verstärkers auf einen Blick.

1.6 Intermodulation

Unter den nichtlinearen Verzerrungen (vgl. Abschnitt 1.3, Klirrfaktor) werden bestimmte Anteile als Intermodulationsverzerrungen bezeichnet. Sie bestehen aus neu entstandenen Summen- oder Differenztönen von solchen Frequenzen, die ursprünglich getrennt zum Verstärker gelangten und die sich in ihm recht unerwünscht mischten. Solche Mischungen, die übrigens nicht nur in Verstärkern, sondern in allen Teilen einer Anlage auftreten können, beeinflussen die Wiedergabegüte stark. Die Intermodulation wird in Prozent angegeben, und zwar bei einem bestimmten Pegel zweier fester Meßfrequenzen. Beispiel: Intermodulation 50 Hz/3000 Hz/4 : 1 = 1,5 %.

1.7 Das Auswerten von Verstärkerdaten

Wir haben die wichtigsten Eigenschaften von Verstärkern, die in den sogenannten „Verstärkerdaten" festgelegt sind, kurz erklärt, um später mit diesen Begriffen arbeiten zu können. Es genügt nun aber nicht, daß man mit diesen Ausdrücken jongliert, sie sich vielleicht auch merkt, ohne sich etwas darunter vorstellen zu können. Hierzu ein Vergleich: Wenn der Kraftfahrer von einer Geschwindigkeit von 40 Stundenkilometern spricht, dann kann er sich auf Grund seiner Praxis darunter ein bestimmtes Fahrtempo vorstellen. Genau so soll es in der Verstärkerpraxis sein. Man muß einen ungefähren Begriff davon haben, was ein Abfall der Verstärkung um beispielsweise 50 % klanglich ausmacht.

An dieser Stelle sei noch auf einige Zusammenhänge hingewiesen, die deshalb so unpopulär sind, weil sie Praktiker, Ent-

wickler, Meßtechniker und Werbefachleute gleichermaßen „auf den Teppich" zurückrufen. Gemeinsam jonglieren sie nämlich frisch-fromm-fröhlich-frei mit Meßwerten, die sich ausnahmslos an das menschliche Ohr wenden, aber häufig wird man den Verdacht nicht los, daß nicht die geringste Vorstellung besteht, wie das Gehör die Meßwerte beurteilt. Das mögen einige Beispiele zeigen:

Da vergleicht jemand den Frequenzbereich eines Verstärkers, der von 50 bis 14 000 Hz überträgt, mit dem eines zweiten Gerätes, das den Bereich 25 bis 12 000 beherrscht. Er neigt dazu, den ersten als „besser" zu bezeichnen, weil „oben" 2000 Hz mehr übertragen werden und unten „nur" 25 fehlen. In Wirklichkeit ist aber dieser Vergleich völlig unsinnig. Die fehlenden 25 Hz bei den Bässen entsprechen nämlich einer ganzen musikalischen Oktave, also zwölf Halbtönen, während die 2000 Hz im Diskant einen bescheidenen Ganzton ausmachen.

Nicht vorbelastete Praktiker und die meisten Werbefachleute zerbrechen sich erregt die Köpfe darüber, ob ein bestimmter Verstärker etwa 12 oder 13,5 Watt leistet. Beide wissen gar nicht, daß das nahezu völlig uninteressant ist. Eine vom Ohr gerade deutlich wahrgenommene Lautstärke-Erhöhung verlangt doppelten Schalldruck entsprechend doppelter Verstärker-Ausgangsspannung. Nach dem Leistungsgesetz $P = U^2 : R$ gehört dazu die vierfache Nf-Leistung. Demzufolge würde einen gerade noch hörbaren Lautstärkezuwachs ein 48-Watt-Verstärker gegenüber einer 12-Watt-Type bringen, weshalb es gar nicht interessiert, ob das ursprüngliche Gerät nun nur 12 oder schon 13,5 Watt liefert.

Solche Vergleiche könnte man in nahezu beliebiger Vielfalt anführen, auch wenn das die damit Beschäftigten recht ungern lesen. Die beiden Beispiele zeigen jedoch eindringlich, daß nackte Zahlen allein nur dann einen vernünftigen Aussagewert haben, wenn man gleichzeitig die Eigenschaften jenes Sinnesorganes berücksichtigt, an das sie sich wenden. Das ist das menschliche Ohr. Wer unbedingt ein wenig abstrakter werden will, kann auch sagen, daß man alle Zahlenwerte erst in musikalische Begriffe umrechnen sollte und beispielsweise nicht in Hertz, sondern in Oktaven denken muß. Das ist zweifellos richtig, denn „nackte" Zah-

lenangaben täuschen mitunter Qualitätsunterschiede vor, von denen das Ohr überhaupt nichts bemerkt.

Wenn man beim Umgang mit Verstärkern sich bemüht, diese Zusammenhänge kritisch zu betrachten, vor allem sie auch richtig auszuwerten, dann stellt sich mit der Länge der Zeit ein gewisser sechster Sinn für diese Dinge ein. Wenn diese Zeilen hierzu anregen, dann haben sie auch in dieser Beziehung ihren Sinn erfüllt. Auf alle Fälle sollte man sich allmählich daran gewöhnen, die in den Firmenangaben niedergelegten Verstärkerdaten aufmerksam durchzudenken und aus ihnen die richtigen Schlüsse zu ziehen.

2 Bestückungsfragen

2.1 Ein- oder Mehrgitterröhren?

Eine immer wieder diskutierte Frage ist die, ob ein Verstärker, der mit Trioden bestückt ist, „besser" sei als ein Pentodenverstärker.

Bekannt ist die Tatsache, daß Pentoden wirtschaftlicher arbeiten als Trioden. Um eine bestimmte Verstärkung zu erreichen, sind bei Trioden mehr Stufen erforderlich und damit auch mehr Heiz- und Anodenstrom. Dieser höhere Aufwand an Röhren wird allerdings zum Teil dadurch ausgeglichen, daß der Pentodenverstärker zusätzliche Schaltmittel zur Linearisierung der Frequenzkurve und zur Erzeugung der Hilfsgitterspannungen erfordert. Die höheren Stromkosten des Triodenverstärkers aber müssen in Kauf genommen werden.

Trotzdem haftet dem Pentodenverstärker der Ruf an, er sei in klanglicher Beziehung schlechter als der Triodenverstärker. Woran liegt das?

Pentoden haben einen höheren Innenwiderstand als Trioden. Deshalb geben schädliche Schaltkapazitäten und die Gitterkapazität der folgenden Stufe leicht Anlaß zur Beschneidung der Höhen. Infolge der hohen Verstärkung muß ferner die Überbrückung der Katodenwiderstände sehr reichlich dimensioniert werden, um keine Verluste bei den Tiefen zu bekommen. Da die Industrie aber heute hochwertige Ausgangsübertrager liefert und man die Gegenkopplungstechnik völlig beherrscht, kann man auch mit Pentoden erstklassige Qualitätsverstärker aufbauen. Gewiß, Gegenkopplung ist kein Allheilmittel, denn sie setzt stets die Verstärkungsziffer herab. Würde man sie zu weit treiben, so würde die Stufenverstärkung einer Pentode so weit absinken, daß man mit gleichem Erfolg eine Triode anwenden könnte. Aber bei halbwegs vernünftigem Aufbau, insbesondere wenn auf kapazitätsarme Verdrahtung (kurze Leitungen im Verstärker) geachtet wird, tritt dieser Grenzfall kaum ein.

Schließlich darf man auch einen wenig beachteten Nachteil der Triode nicht vergessen: Bei diesem Röhrentyp ist die Anoden-Gitterrückwirkung größer als bei Pentoden, bei denen sich zwischen den beiden genannten Elektroden noch das Schirmgitter befindet. Man kann sich die Rückwirkung so vorstellen, als ob zwischen Anode und Gitter ein kleiner Kondensator liegen würde. Er bewirkt eine Gegenkopplung bei den hohen Tönen, die deren Verstärkung vermindert. Je größer nun der Innenwiderstand der vorgeschalteten Tonspannungsquelle ist, um so mehr wirkt sich diese Höhendämpfung aus. Das trifft zum Beispiel zu, wenn die vorhergehende Röhre eine Pentode mit hohem Außenwiderstand (einige hundert Kiloohm) ist oder wenn man einen hochohmigen (1 MΩ) Lautstärkeregler vorschaltet.

Alte Verstärkerpraktiker rühmen noch heute ihren „reinen Triodenverstärker" mit zwei Endröhren AD 1 aus den dreißiger Jahren. Wir lernen diese ungewöhnlich bausichere Schaltung noch auf Seite 19 kennen. Leider wird bei diesem Loblied eine wichtige Tatsache übersehen: Da Endtrioden weniger Eigenverstärkung aufweisen als Pentoden, brauchen sie eine verhältnismäßig hohe Steuerspannung, bei der Röhre AD 1 in Gegentakt-AB-Schaltung sind das rund 2 × 45 V. Bei dieser hohen Wechselspannung macht sich aber in den Vorstufen nur dann kein störender Klirrgrad bemerkbar, wenn man sie sehr genau einstellt und ihnen eine recht hohe Anodenspannung zuführt. Pentodenverstärker sind in dieser Beziehung weniger kritisch, einmal weil die Vorstufen weniger weit ausgesteuert werden müssen, und schließlich auch deshalb, weil die stets vorhandene Gegenkopplung restliche Vorstufenverzerrungen nahezu restlos kompensiert. Die Kehrseite: Die Schaltungen sind ein wenig komplizierter.

Schließlich sei beim Gegenüberstellen charakteristischer Unterschiede zwischen beiden Röhrenarten noch an folgendes erinnert. Ganz roh gerechnet verstärkt eine Vorstufentriode 30fach, eine Pentode etwas mehr als 100fach. Um eine bestimmte Vorstufenverstärkung zu erzielen, braucht man also mehr Triodenals Pentodensysteme. Die Sache sieht aber sofort anders aus, wenn man an moderne Doppeltrioden (z. B. ECC 83) denkt. Nach außen erscheinen zwei Systeme eben doch nur als *eine* Röhre.

Sie brauchen praktisch den gleichen Strom wie eine Vorstufenpentode und liefern wesentlich mehr Verstärkung, nämlich etwa neunmal so viel. Manche Konstrukteure nutzen diesen Verstärkungsüberschuß raffiniert aus, indem sie die beiden Triodensysteme in sich gegenkoppeln (stark gezeichnet in **Bild 2**). Sie

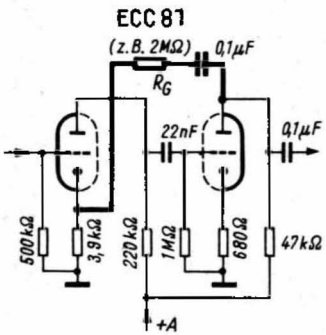


Bild 2. Zwei in sich gegengekoppelte Systeme einer Doppeltriode

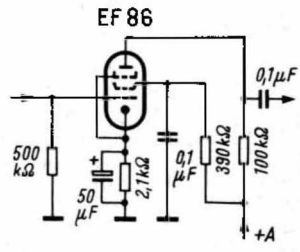


Bild 3. Pentodenstufe im Vergleich zu Bild 2

bemessen den Widerstand R_G ungefähr so, daß die Gesamtverstärkung der einer Pentode entspricht. Der Gewinn liegt nun zwar nicht mehr in der Verstärkungsziffer, aber dafür wird das Röhrengespann äußerst stabil, im hohen Maß übersteuerungsfest und es arbeitet praktisch frequenzunabhängig. Ein Vergleich mit **Bild 3** läßt erkennen, daß man zwar drei billige 0,25-Watt-Widerstände mehr braucht, aber dafür einen teuren Niedervolt-Elektrolytkondensator einspart. Verwendet man jene modernen Lötstützpunkt-Rosetten, die man von unten auf das mittlere Metallröhrchen der Röhrenfassung aufsteckt, dann läßt sich dort die Verdrahtung der Zwillingsstufe mühelos unterbringen.

Wägt man die genannten Vorzüge und Nachteile von Pentoden und Trioden gegeneinander ab, so muß man sich davon überzeugen, daß beide Röhrentypen ihre Daseinsberechtigung haben und daß es falsch wäre, sich grundsätzlich für diese oder jene zu entscheiden.

Bild 4 zeigt die Schaltung eines typischen Selbstbauverstärkers mit Trioden, wie er trotz der benutzten älteren Röhrentypen

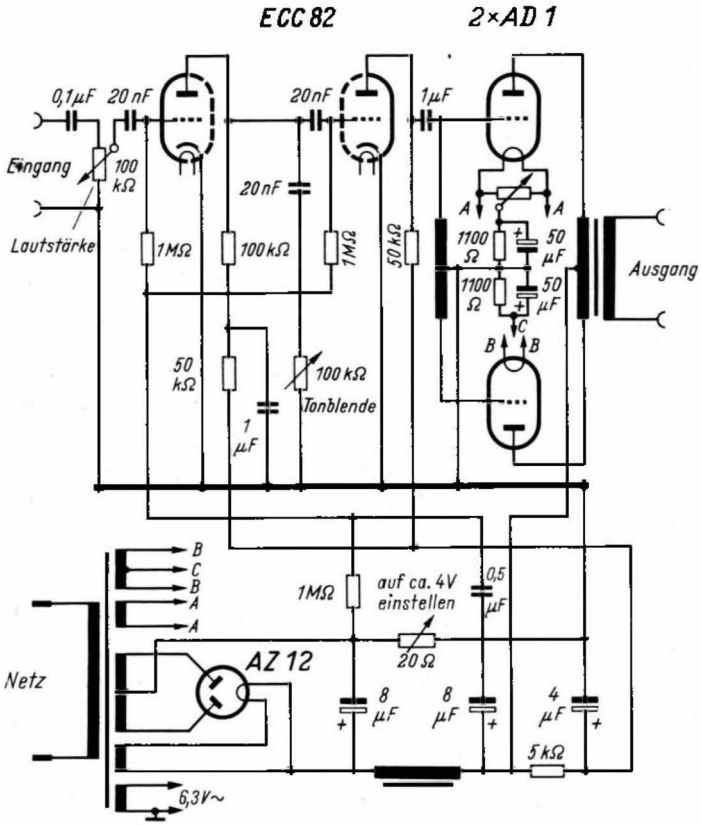


Bild 4. Typischer Triodenverstärker, der sich wegen seiner einfachen Schaltung gut zum Selbstbau eignet

auch heute noch gelegentlich gebaut wird. Die Schaltung ist sehr bausicher, und wenn man einen erstklassigen Ausgangsübertrager benutzt, läßt sich mühelos der Frequenzbereich zwischen 20 und 20 000 Hz ungeschwächt übertragen. Zur Phasenumkehr dient eine mittenangezapfte Drossel. Hierfür eignet sich prak-

tisch jeder ältere Gegentakt-Zwischenübertrager, dessen Primärwicklung unbenutzt bleibt. Wegen der gleichstromfreien Ankopplung über 1 µF steht nämlich stets die volle Leerlaufinduktivität zur Verfügung, so daß man auch mit Ausführungen mäßiger Qualität auskommt.

Die Schaltung läßt sich noch modernisieren, wenn man auf die Gleichrichterröhre AZ 12 verzichtet und ihre beiden Gleichrichterstrecken durch Silizium-Dioden ersetzt. Dann entfällt auf dem Netztransformator die zugehörige Heizwicklung für 4 V, die Anodenspannungswicklung für 2 × 250 V/100...120 mA bleibt jedoch auch hier erforderlich. Genauso gut eignet sich aber ein Transformator modernerer Fertigung mit einer Anodenspannungswicklung für 1 × 250 V/100...120 mA, wenn man einen Trocken-Brückengleichrichter, z. B. B 250/150, vorsieht.

In **Bild 5** ist die Schaltung eines hochwertigen Pentodenverstärkers gezeigt. Der Katodenwiderstand der ersten Stufe ist nicht überbrückt. Dadurch entsteht eine gewollte Stromgegenkopplung, die zur Linearisierung der Frequenzkurve ausgenutzt wird. Die Schirmgitterspannung ist mit 0,1 µF nach Katode (!) verblockt. Die zweite Röhre arbeitet als Triode. Auch hier ist der Katodenwiderstand nicht überbrückt, weil von der Endstufe eine Gegenkopplungsspannung eingeführt wird. Längswiderstände vor den Steuergittern und sehr sorgfältige Entkopplung in der Stromversorgung sorgen für stabiles Arbeiten. Wenn man einen guten Ausgangsübertrager, z. B. mit verschachtelter Wicklungsart, verwendet, läßt sich ebenfalls der Frequenzbereich von 20 bis 20 000 Hz beherrschen. An Stelle der im Schaltbild angegebenen Röhren eignen sich praktisch alle ähnlichen Typen mit gleich gutem Erfolg, z. B. EF 12, EF 86, EF 804 als Vorröhren, EL 11, EL 12, EL 34, EL 41, EL 84, EL 95, EL 156 als Endröhren oder entsprechende Paralleltypen anderen Fabrikates. In der Bemessung der Schaltung ändert sich nur der Wert des Katodenwiderstandes in der Endstufe, der nach der Röhrenliste auszuwählen ist. Der Netztransformator ist so zu bemessen, daß er die für die letzte Röhre vorgeschriebene Betriebspannung liefern und die Belastung in mA aushalten kann. Diese Angaben lassen sich aus den Röhrenlisten ersehen, und wenn man für die Vorröhren 15 mA Anoden- und Schirmgitterstrom veranschlagt

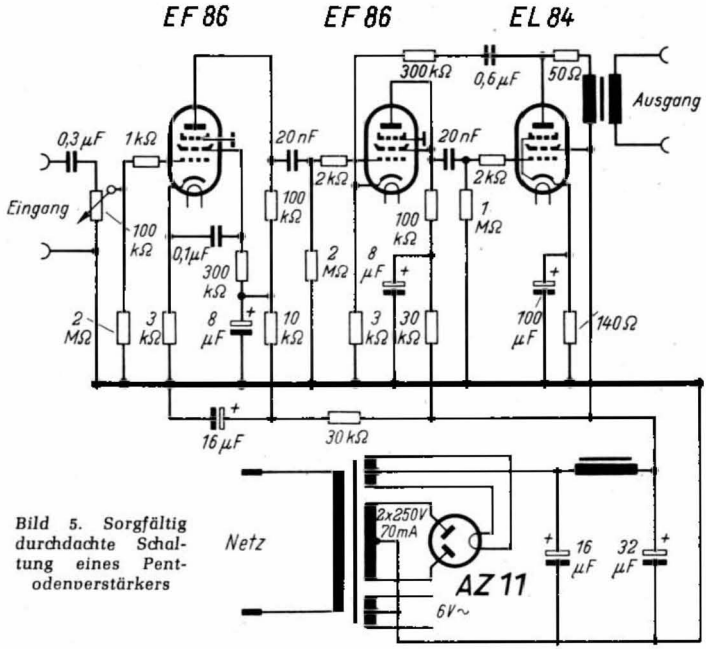


Bild 5. Sorgfältig durchdachte Schaltung eines Pentodenverstärkers

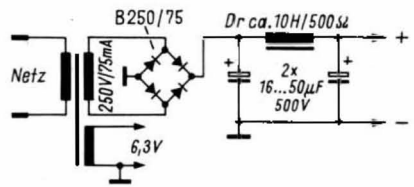


Bild 6. Netzteil zum Verstärker nach Bild 5 bei Verwendung eines Selengleichrichters

und zum Bedarf der Endstufe hinzurechnet, ist es leicht, den Netzteil für jeden Fall richtig auszulegen. Selbstverständlich kann an die Stelle der Gleichrichterröhre auch ein Trockengleichrichter gleicher Leistung treten. Am besten wählt man einen solchen in Brückenschaltung, weil man dann einen billigeren Netztransformator verwenden kann, bei dem die Anodenspannunswicklung keine Mittelanzapfung besitzen muß. Den hierzu gehörenden Netzteil zeigt **Bild 6.**

2.2 ... oder Transistoren?

Diese in der Überschrift angeschnittene Frage ist nicht leicht zu beantworten. Sofern man nämlich nicht nur nüchtern-technische Gesichtspunkte berücksichtigt, sondern auch wirtschaftliche, kann man mit vielem Wenn und Aber antworten.

Zunächst einmal gilt grundsätzlich das im Abschnitt 1 Gesagte: Die rasche Entwicklung der Transistor-Technik macht es ungemein schwer, einigermaßen zukunftssichere Schaltungen vorzuschlagen, denn solche, die noch heute hochmodern sind, lassen sich morgen allein deshalb nicht mehr bedenkenlos nachbauen, weil die im Mustergerät benutzten Transistoren gar nicht mehr gefertigt werden. Daran kann der Autor nichts ändern, und er kann nur trösten: Meist verfügen Einzelteil-Versandhäuser noch sehr lange nach dem Auslaufen einer Type über beachtliche Stückzahlen, die noch dazu recht billig sind.

Soweit sich in unserer modernen Technik überhaupt Prognosen stellen lassen, scheinen eines Tages Nf-Verstärker vorwiegend mit Transistoren bestückt zu werden. Dabei muß man sich stets überlegen, ob das kostenmäßig sinnvoll ist. Bei Netzspeisung ist es beispielsweise ziemlich uninteressant, ob ein bestimmter Spezialverstärker 3 oder 13 Watt Leistung aufnimmt. Nimmt man etwa einen ganz einfachen Rufverstärker an, vielleicht auch einen sehr einfach gestalteten Modulationsverstärker für einen Amateursender, der 4 W Sprechleistung abgeben muß, dann ergibt sich folgendes: Bei Röhrenbestückung kommt man (modernes Kohlemikrofon vorausgesetzt) mit einer einzigen Röhre EL 84 aus, die im Versandhandel meist weniger als 10 DM kostet. Entschließt man sich für Transistoren, so braucht man wenigstens vier Exemplare und dazu zwei teure Spezialübertrager. Demzufolge gibt es wirklich noch Gesichtspunkte, die man recht genau und kritisch gegeneinander abwägen muß.

Ähnliche Überlegungen gelten für vollständige Verstärker, besonders wenn Leistungen über 25 Watt gefordert werden: Hier beginnen die Kühlprobleme der Endtransistoren eine Rolle zu spielen. Namhafte Konstrukteure versichern immer wieder, daß zur Zeit ein Nf-Verstärker mit 50 oder 100 Watt Ausgangsleistung und Transistoren nicht kleiner zu bauen ist als eine vergleichbare Röhren-Ausführung. Das verböten die erforderlichen Kühl-

flächen. Ein solches Gerät braucht zwar weniger Speiseleistung (weil die Heizung entfällt), aber bei Netzbetrieb spielt das keine entscheidende Rolle. Fragt man nach den Kosten, so ist der Röhrenverstärker wesentlich billiger als eine mit Transistoren bestückte Type, und schließlich läuft die Entscheidung nur darauf hinaus, ob ein Lichtnetz zur Verfügung steht oder nicht. Ist man freilich allein auf Batterien angewiesen, dann schneidet natürlich der Transistorverstärker viel günstiger ab, obwohl er wegen seiner zusätzlich erforderlichen Stufen teurer ist.

Vergleiche dieser Art lassen sich nach vielen Richtungen anstellen. Auf keinen Fall führen sie aber im gegenwärtigen Zeitpunkt zu einer allgemein gültigen „Patentantwort". Im Augenblick [1]) ist es jedenfalls so, daß in Nf-Verstärkern Trioden, Pentoden und Transistoren nach wie vor nebeneinander ihre Berechtigung haben, sofern man von Fall zu Fall die gerade günstigste Entscheidung trifft.

[1]) d. h. Anfang 1969

3 Verstärker-Bausteine

3.1 Mikrofonverstärker

Moderne Mikrofone, die auch für Musikwiedergabe geeignet sind, geben im Betrieb nur sehr geringe Tonspannungen ab. Diese reichen in der Regel nicht aus, einen normalen Kraftverstärker mit etwa 100 mV Eingangsempfindlichkeit auszusteuern. Deshalb ist entweder ein getrennter Vorverstärker erforderlich, oder man muß diesen unmittelbar in den Mikrofonkanal des Hauptverstärkers (vor dem Eingangsumschalter) einfügen.

Da unsere heutigen Mikrofone — von ganz billigen Importtypen abgesehen — den ganzen interessierenden Frequenzbereich übertragen, sind Korrekturschaltungen im Vorverstärker überflüssig, was seinen Aufbau vereinfacht. Dafür macht ihn aber die hohe nachfolgende Verstärkung für unerwünschte Störeinstreuungen aller Art recht anfällig. Besonders gefährdet sind in dieser Beziehung die Mikrofon-Eingangsübertrager, die nieder- und mittelohmige dynamische und Kondensator-Mikrofone an den hohen Eingangswiderstand von Röhrenschaltungen anpassen. Bei ungeschickter Anordnung können sie in die Streufelder von Netztransformatoren oder Drosseln geraten und so äußerst unangenehmes Brummen in die Übertragung einschleppen. Dieser Mangel haftet mit Mu-Metall gekapselten Typen nicht an, sie sind gegen Störfelder weitgehend unempfindlich, und man sollte sie heute eigentlich ausschließlich verwenden. Trotzdem sei ein Tip gegeben, wie man auch ältere mangelhaft oder gar nicht gekapselte Ausführungen weiterbenutzen kann: Man sieht sie für getrennte Vorverstärker ohne eigenen Netzteil vor und hängt das ganze Gerät in 1 bis 2 m Entfernung vom Hauptverstärker z. B. an der Wand auf. Die störenden Kraftlinien sind dann bereits so schwach geworden, daß sie keinen hörbaren Einfluß mehr ausüben können.

Weitere Brummstörungen können unter Umständen über schlecht oder gar nicht abgeschirmte Eingangs- bzw. Gitterlei-

tungen eindringen oder auch von unerwünschten Wechselspannungsresten in der Stromversorgung herrühren. Es ist noch gar nicht so lange her, daß man bei hohen Qualitätsansprüchen, z. B. in Studios, ausschließlich Batterien zur Stromversorgung benutzte. In verzweifelten Fällen, etwa wenn bei fliegend aufgebauten Anlagen die Zeit zur Fehlersuche fehlt, ist das auch heute noch keine schlechte Behelfslösung.

Immerhin, die meisten Praktiker und erst recht die Verstärkerkonstrukteure beherrschen heute alle Kniffe, die brummfreien Betrieb netzgespeister Mikrofonvorverstärker sichern. Die Anodenspannung befreit man in mehrgliedrigen Siebketten mit verhältnismäßig großen Kapazitäten von allen Wechselspannungsresten, und die Heizstromversorgung übernehmen mittelpunktgeerdete Sonderwicklungen, wenn man nicht gleich auf den bewährten Entbrummer zurückgreift.

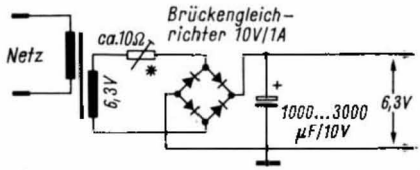
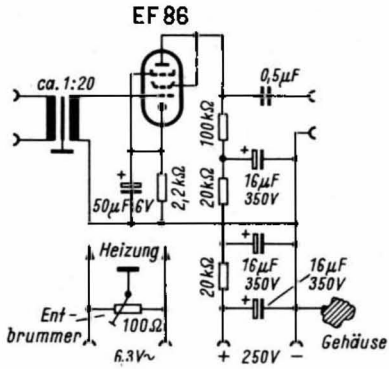


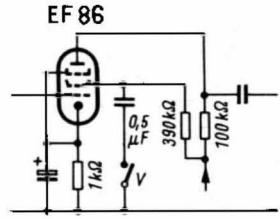
Bild 7. Netzteil zur Heizspannungsversorgung eines Mikrofonverstärkers

In ganz hartnäckigen Fällen wird die Heizspannung mit einem Brückengleichrichter gleichgerichtet und mit einem Kondensator von 1000 µF/10 V geglättet (**Bild 7**). An der mit einem Stern bezeichneten Stelle muß ein Trimmwiderstand eingefügt werden, mit dem sich die Sollspannung (z. B. 6,3 V) genau einstellen läßt. Der Elektrolytkondensator hat nämlich die Tendenz, sich wie jeder Ladekondensator in Netzteilen auf die Scheitelspannung aufzuladen, so daß ohne den Stellwiderstand Überheizungsgefahr besteht.

Bild 8 zeigt die Schaltung eines Einröhren-Vorverstärkers, der mit einer als Triode geschalteten Röhre EF 86 bestückt ist. Er kann entweder aus Batterien betrieben, oder seine Betriebsspannungen können dem Netzteil des Hauptverstärkers entnommen werden. Die Röhre kann also wahlweise mit Wechsel- oder Gleichstrom geheizt werden. Für Wechselstromheizung ist ein besonderer Entbrummer vorgesehen. Weil dessen Schleifer an



Oben: Bild 8. Mikrofon-Vorverstärker



Oben: Bild 9. Pentoden-Vorstufe mit Verstärkungs-Umschalter V

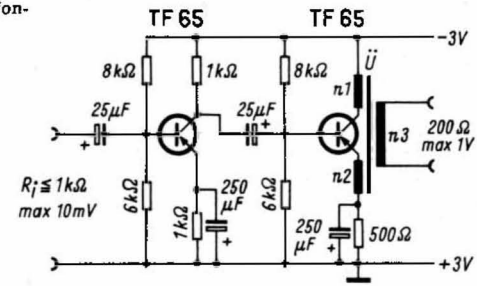


Bild 10. Transistor-Mikrofon-Vorverstärker

Masse liegt, ist zu beachten, daß die Heizwicklung im Hauptverstärker nicht bereits irgendwie mit Masse verbunden ist. Der Eingangsübertrager ist etwa 1 : 20 übersetzt und erlaubt den Anschluß von Kondensatormikrofonen sowie von Kohle- und dynamischen Mikrofonen mit einem Kennwiderstand von etwa 200 Ω. Die Anodenspannung ist sehr sorgfältig durch eine dreigliedrige Siebkette gefiltert. Bei Heizung nach Bild 7 entfällt der Entbrummer.

Reicht die erzielte Vorverstärkung nicht aus, so kann man die Röhre EF 86 auch als Pentode betreiben; dann kommen ein Schirmgitterkondensator (0,5 µF) und ein Schirmgitterwiderstand hinzu. **Bild 9** zeigt diese Schaltungsvariante mit einem zusätzlichen Kniff in Gestalt des Verstärkungs-Umschalters V. Ist er geöffnet, dann arbeitet die Röhre infolge der Schirmgitter-Gegenkopplung

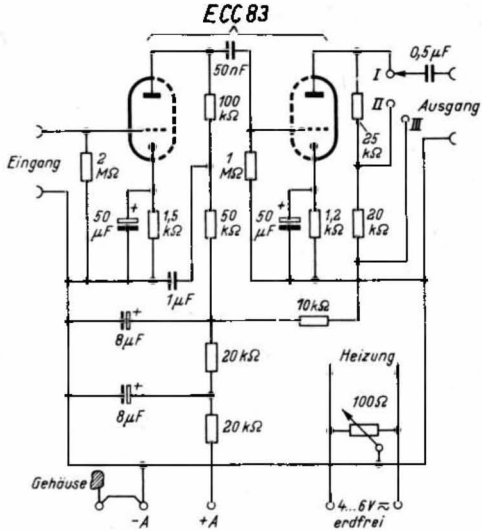


Bild 11. Zweistufiger Vorverstärker für Kristallmikrofone

wie eine Triode, und die Verstärkung sinkt ab. Manchmal erweist sich ein solcher behelfsmäßiger „Pegel-Voreinsteller" als recht praktisch, weil er das Gerät universeller macht.

Eine Transistorschaltung für den gleichen Verwendungszweck, also für die Vorverstärkung eines dynamischen Mikrofons, empfiehlt Siemens (**Bild 10**). Weil der Eingangswiderstand einer Emitterstufe mittelohmig ist (ca. 1 kΩ), entfällt der Eingangsübertrager. Die sonst von diesem bewirkte Spannungserhöhung übernimmt der erste Transistor TF 65. Zur Nachverstärkung dient eine weitere Stufe, die der Ausgangsübertrager Ü abschließt. Dadurch wird die abgehende Leitung niederohmig und erdsymmetrisch, sie kann bedenkenlos bis zu 200 m lang gemacht werden (wichtig bei Reportagen). Höhenverluste sind dabei nicht zu befürchten, und der relativ hohe Pegel (max. 1 V) macht sie auch wenig anfällig gegen Störeinstreuungen. Die Übertrager-Daten lauten: Kern = Dynamoblech IV/0,34 für Kern M 30/7, je 25 % der Bleche gleichsinnig geschichtet. Wicklungen: n 1 = 800 Wdg./CuL 0,13 mm, n 2 = 100 Wdg./CuL 0,13 mm, n 3 = 600 Wdg./0,15 mm. Die übrigen Daten sind:

Frequenzbereich = 50 Hz bis 20 kHz
Spannungsverstärkung = 100fach
Störabstand ≈ 50 dB
Klirrfaktor < 1 %

Kristallmikrofone haben einen sehr hohen (kapazitiven) Innenwiderstand, sie verlangen deshalb einen hochohmigen Verstärkereingang. **Bild 11** zeigt eine bewährte Vorverstärkerschaltung mit der Doppeltriode ECC 83. Der Arbeitswiderstand des zweiten Systems ist unterteilt. Durch Umklemmen ist es möglich, drei verschiedene Verstärkungsziffern einzustellen. Auch dieser Vorverstärker kann wahlweise mit Batterien oder aus dem Netzteil des Hauptverstärkers betrieben werden.

Bild 12 zeigt einen netzbetriebenen zweistufigen Vorverstärker mit niederohmigem Ein- und Ausgang. Ein solches selbständiges Gerät ist in der Praxis überaus zweckmäßig, weil die niederohmige Ausgangsleitung beliebig lang (bis 200 m) und oft sogar unabgeschirmt ausgeführt werden kann. Der mit Mu-Metall ge-

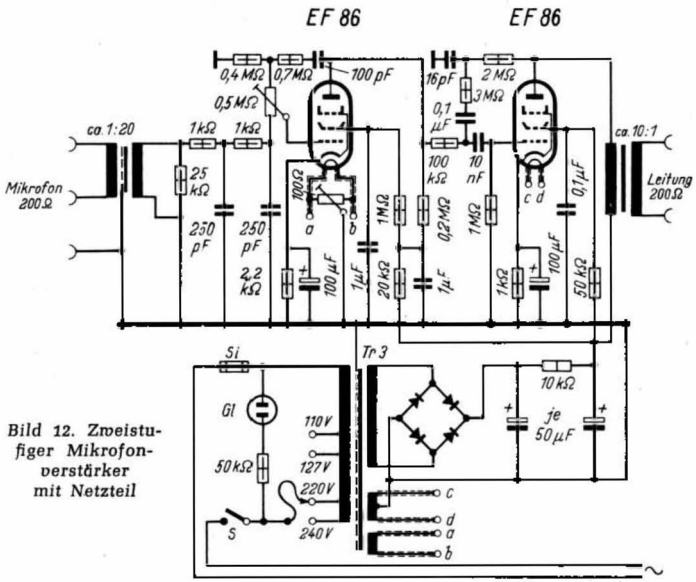


Bild 12. Zweistufiger Mikrofonverstärker mit Netzteil

kapselte Eingangsübertrager erlaubt den Anschluß von Mikrofonen mit einem Scheinwiderstand von etwa 200 Ω. Zur weitgehenden Linearisierung der Frequenzkurve sind beide Stufen gegengekoppelt. Lautstärkeeinsteller und Entbrummer sind mit dem Schraubenzieher bei Inbetriebnahme auf den günstigsten Wert einzustellen. Durch einen Schaltkniff wird erreicht, daß die Mindestlautstärke nicht „Null" ist, sondern etwa 2 %. Dadurch kann nicht durch versehentliches Zudrehen des Lautstärkepotentiometers der Eindruck erweckt werden, der Vorverstärker sei schadhaft. Das ist im praktischen Betrieb sehr nützlich, um bei einer Störungssuche unnötigen Zeitverlust zu vermeiden.

Der Netztransformator ist eine Type für 1 × 250 V/15 mA und 2 × 6,3 V/0,5 A in Verbindung mit einem Brückengleichrichter B 250/15. Wegen des geringen Anodenstrombedarfs kommt man an Stelle einer Drossel mit einem 10-kΩ-Widerstand zur Siebung aus.

3.2 Fotozellenverstärker

Für die Wiedergabe von Lichtton-Aufzeichnungen (Tonfilm) braucht man einen Fotozellen-Vorverstärker. Er hat praktisch die gleiche Aufgabe wie ein Mikrofon-Vorverstärker, er muß nämlich die niedrige von der Fotozelle gelieferte Tonspannung so weit verstärken, daß man damit den Hauptverstärker aussteuern kann; jedoch werden noch zwei Sonderforderungen gestellt, die der Betrieb im Lichtspielhaus bedingt. Die Gleichstromvorspannung (Saugspannung) für die Fotozelle muß ohne Inanspruchnahme von Batterien direkt aus dem Verstärker entnommen werden können, und zwar getrennt für zwei Projektoren, und die Lautstärke muß vom Zuschauerraum aus einstellbar sein. Diese Ferneinstellung über einen „Saalregler"[1]) ist deshalb erforderlich, weil der Vorführer wegen des Laufgeräusches der Vorführmaschinen und wegen der räumlichen Trennung vom Zuschauerraum gar nicht in der Lage wäre, die eingestellte Lautstärke richtig zu beurteilen.

In **Bild 13** ist die Schaltung eines solchen Verstärkers gezeigt, wie er entweder als selbständige Einheit in Verbindung mit

[1]) Zwar wäre die Bezeichnung „Saaleinsteller" korrekter, aber der bisherige Ausdruck hält sich hartnäckig im Sprachgebrauch der Kino-Fachleute.

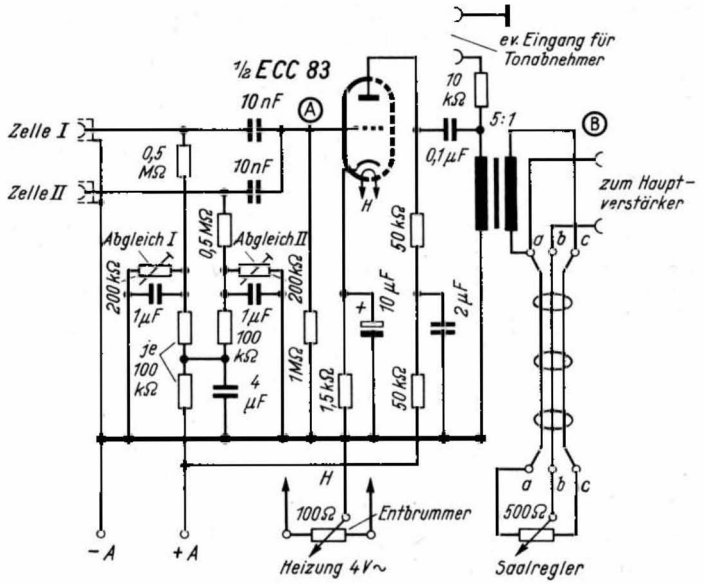


Bild 13. Fotozellenverstärker mit Saalregler

einem handelsüblichen Kraftverstärker, oder auch gleich als Teil eines solchen verwendet wird. Da die Fotozelle eine Vorspannung braucht und kein Strom fließt, können die Siebwiderstände sehr groß gewählt werden, so daß ohne viel Aufwand ausreichende Siebzahlen erzielbar sind. Die Empfindlichkeit der Fotozelle hängt von der erteilten Vorspannung und dem Alter der Zelle ab. Deshalb ist es üblich, die Zellenspannung einstellbar zu machen, um beide Projektoren auf gleiche Lautstärke abgleichen zu können. Das ist erforderlich, damit beim Aktschluß und dem dabei erfolgenden Überblenden auf die andere Maschine keine Lautstärkesprünge auftreten. In einfacher Weise ist dieser Abgleich durch die beiden Ballastwiderstände von 200 kΩ möglich, die mit dem Schraubenzieher bedienbar sind.

Das zweite Problem, die Ferneinstellung, macht folgende Überlegung nötig: Die Scheinwiderstandsverhältnisse im Tonfre-

quenzkanal sind sowohl gitter- als auch anodenseitig hochohmig. Wenn man hier ein Potentiometer über eine längere Leitung anschließt, werden die hohen Töne infolge der Leitungskapazität stark beschnitten. Außerdem wäre es nicht ganz einfach, eine wirklich zuverlässige Abschirmung über die gesamte Leitungslänge zu garantieren. Deshalb werden verschiedene Lösungen angewandt, um diese Schwierigkeiten zu beseitigen. Das älteste dem Verfasser bekannte und auch viele Jahre benutzte Verfahren zeigt Bild 13. Hinter der Vorröhre ist ein Abwärtsübertrager 5 : 1 eingefügt, der die Saalregler-Leitung niederohmig macht (ca. 500 Ω). Bei diesem Leitungswiderstand, der ungefähr dem einer Telefonleitung entspricht, treten die angeführten Schwierigkeiten nicht mehr auf. Der Spannungsverlust (Abwärts-Übertrager) von 80 % kann am Eingang des Hauptverstärkers durch einen Aufwärtsübertrager, der ohne weiteres 1 : 20 übersetzt sein darf, mehr als wettgemacht werden. Um allerdings lineare Verzerrungen durch die zweimalige Transformation zu vermeiden, müssen die Übertrager erstklassig sein. Außerdem verlangen sie eine Mu-Metall-Kapselung, um nicht Brummeinstreuungen aus dem Netzteil aufzunehmen. Diese ältere Schaltung erfaßt mit dem Saalregler bereits einen zusätzlich angeschlossenen Plattenspieler oder ein Tonbandgerät, dessen Lautstärke (Begleitmusik für Werbe-Dias) ebenfalls vom Saal aus nachstellbar sein soll.

Weil wirklich hochwertige Übertrager teuer sind, möchte man sie gern einsparen. Wie das recht elegant möglich ist, zeigt der Schaltungsauszug in **Bild 14**. Das erste System der Doppeltriode ECC 83 arbeitet als Impedanzwandler mit niederohmigem Katodenausgang (Buchse 1). Von hier führt eine Leitung zum Saalregler im Zuschauerraum. Diese Baugruppe enthält sogar drei Potentiometer, mit denen sich die Wiedergabe der Höhen und Tiefen (Entzerrung) und die Gesamtlautstärke einstellen lassen. Vom Ausgang des Saalreglers (Buchse 2) führt eine Leitung zurück zum Verstärker, und zwar zum Steuergitter des zweiten Systems der Doppeltriode. Die Nullung des Lautstärkeeinstellers ist übrigens nur der Übersichtlichkeit halber in das Kästchen des Saalreglers eingezeichnet. In Wirklichkeit erfolgt sie über eine dritte Leitung innerhalb des Verstärkers. Die vollständige Schal-

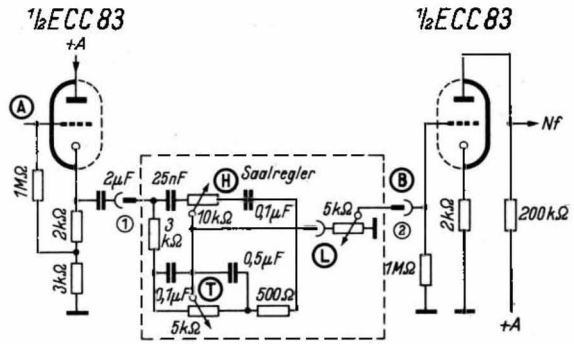


Bild 14. Niederohmiger Saalregler-Entzerrer in Katodenausgangs-Schaltung
Einsteller: L = Lautstärke, H = Höhen, T = Tiefen

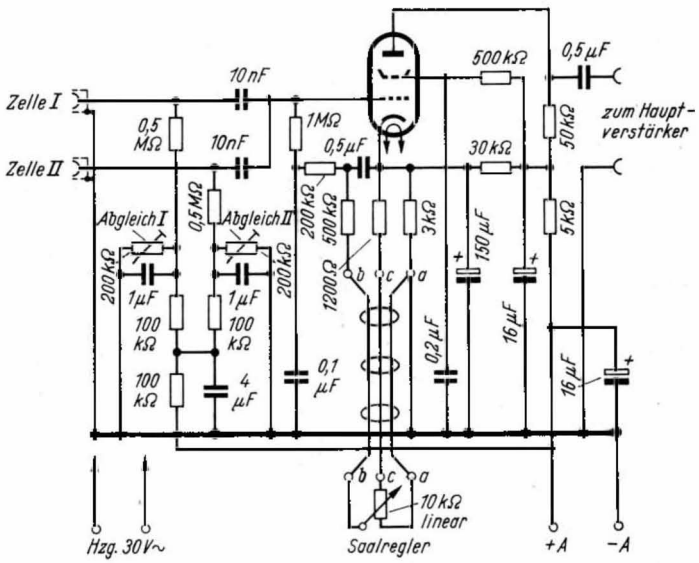


Bild 15. Fotozellenverstärker für zwei Projektoren
mit Gittervorspannungs-Saalregler. Röhre = z. B. EF 83

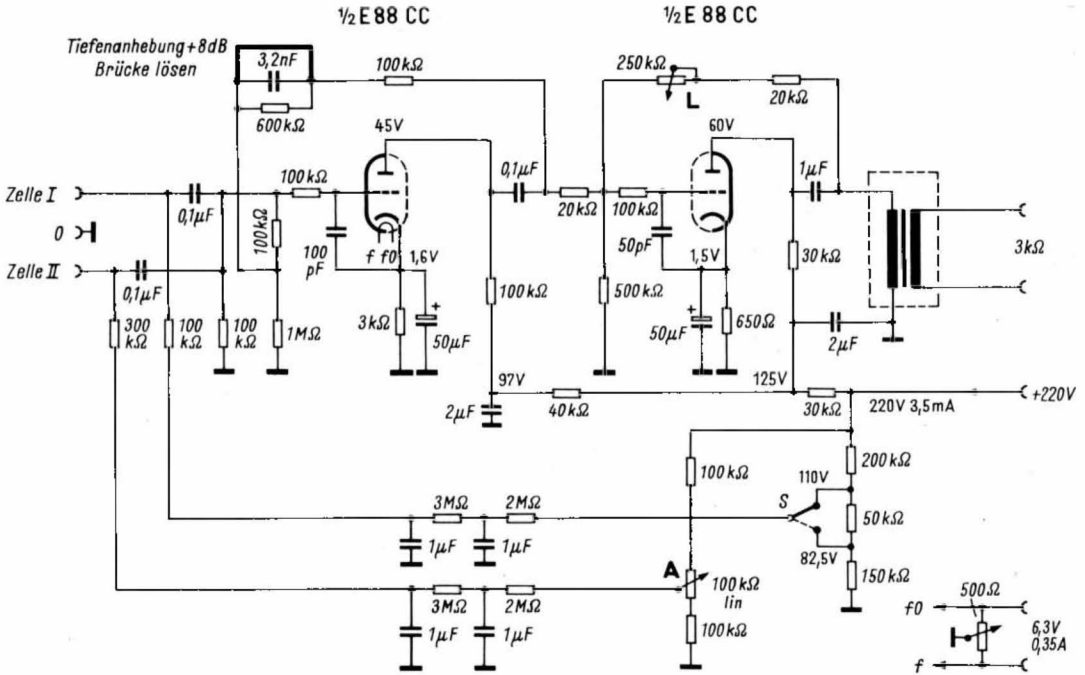


Bild 16. Die Schaltung des Fotozellenverstärkers V 017 von Siemens-Klangfilm

tung eines Fotozellenverstärkers mit Katoden-Einstellstufe erhält man, wenn sinngemäß vor Punkt A in Bild 14 der entsprechende Schaltungsteil von Bild 13 gezeichnet wird.

Eine weitere Möglichkeit, beim Saalregler ohne Übertrager auszukommen, zeigt **Bild 15.** Hier wird nicht im Tonfrequenzkanal selbst eingestellt, sondern man verändert die Gittervorspannung (=Verstärkung) einer Regelröhre. Dadurch führt die Regelleitung nur Gleichstrom und ist nahezu unempfindlich gegen Einstreuungen aller Art. Teure Übertrager entfallen, der Aufbau wird sehr einfach, und der bei der Schaltung nach Bild 13 durch zusätzliche Aufwärtstransformation erzielbare Gewinn an Verstärkung wird hier schon von Haus aus durch die höhere Verstärkungsziffer der verwendeten Röhre sichergestellt. Die Entkopplungs- und Siebmaßnahmen sind bei derartigen Verstärkern sehr sorgfältig durchgeführt. Die Einkopplung der Tonfrequenz von einem Plattenspieler, einem Kinogong oder einem Magnettongerät erfolgt bei einem Verstärker nach Bild 13 über einen Vorwiderstand an der Primärseite des Abwärtsübertragers. Bei dem Verstärker nach Bild 14 müßte die Einkopplung bereits im Gitterkreis erfolgen, damit die zusätzlich angeschlossenen Tonfrequenzquellen durch den Saalregler mit erfaßt werden. Das ist aber nicht ganz einfach, denn dann braucht man wieder zusätzliche Dämpfungsglieder. Daher wird vielfach in Kinoverstärkern wie folgt verfahren:

Die Fotozellenverstärkung erfolgt in einer einfachen Triode, so wie es Bild 13 zeigt. Der Abwärtsübertrager entfällt und die zusätzlichen Tonfrequenzquellen liegen über Vorwiderstände und einen Trennkondensator an der Trioden-Anode. Erst die zweite Stufe ist dann eine Regelröhre mit Ferneinstellung gemäß Bild 15, nur fällt dann natürlich die RC-Kettenanordnung weg, die die Fotozellenvorspannung erzeugt, weil diese ja bereits in der ersten Stufe hergestellt wird.

Ein in vielen Kinos benutzter Fotozellenverstärker ist die Type V 017 von Siemens-Klangfilm (**Bild 16**). Das Gerät enthält die Langlebensröhre E 88 CC mit zwei Triodensystemen, und sein Ausgang ist für 3 kΩ ausgelegt. Mit dem Umschalter S kann man je nach benutzter Fotozelle 82,5 oder 110 V Saugspannung für die eine der beiden Maschinen einstellen. Mit dem Potentiome-

ter A wird die zweite Maschine auf gleichen Lautstärke-Pegel abgeglichen. Zur gemeinsamen Lautstärkeeinstellung dient der Gegenkopplungswiderstand L. Beachtung verdient die auslötbare Drahtbrücke (stark gezeichnet), die im Gegenkopplungszweig des ersten Systems liegt und die beim Entfernen eine Tiefenanhebung bewirkt, die manchmal bei längeren Fotozellen-Zuleitungen erforderlich wird.

3.3 Lautstärke-Ferneinstellung mit Fotowiderständen

Eine ganz moderne Art der Lautstärke-Ferneinstellung (Saalregler) eröffnen Fotowiderstände. Diese unmittelbar in den Verstärker einlötbaren Bauelemente sind etwa so groß wie ein Skalenlämpchen und sie haben die merkwürdige Eigenschaft, daß ihr Innenwiderstand bei Dunkelheit sehr, sehr hoch (je nach Type z. B. 10 MΩ) und bei Beleuchtung fast null (z. B. 100 Ω) ist. Zwischen diesen beiden Extremwerten ändert sich die Ohmzahl in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke. Fotowiderstände verhalten sich also ganz ähnlich wie ein Drehwiderstand, nur mit dem Unterschied, daß die Widerstandsänderung nicht unmittelbar mit der Hand, sondern von der Lämpchen-Helligkeit bestimmt wird.

Natürlich ist die menschliche Hand auch irgendwie im Spiel, sie muß nämlich weit entfernt an einem Widerstand drehen, der das im Verstärker enthaltene und lichtdicht eingebaute (Schutz vor Fremdlicht) Lämpchen fernsteuert. Aber das nach dort führende Schwachstromkabel wird zu einer ganz harmlosen, tonspannungsfreien „Lichtleitung" die auch bei unabgeschirmtem Verlegen völlig unempfindlich gegen Störeinstrahlungen ist. Theoretisch könnte sie viele Kilometer lang sein.

Bild 17 erklärt das Prinzip. Der bei a gezeigte Lautstärkeeinsteller P (= Potentiometer) läßt sich mit gleichem Erfolg durch einen Drehwiderstand R_V in Reihe mit dem Querwiderstand R_Q ersetzen (b in Bild 17). Diese Anordnung bewirkt ein Verändern der Lautstärke im Verhältnis 1 : 100 000. Genauso verhält sich die Schaltung nach Bild 17 c, in der R_V durch den Fotowiderstand R_F ersetzt wurde. An die Stelle des Widerstandsschleifers tritt jetzt die Ferneinstellung, bestehend aus dem Lämpchen L, der Drahtleitung D, dem Saalregler FB und der Lämpchen-Strom-

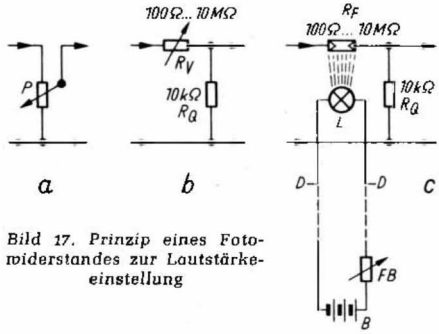


Bild 17. Prinzip eines Fotowiderstandes zur Lautstärkeeinstellung

quelle B. Eine besondere Annehmlichkeit dieser „optischen" Potentiometer ist, daß sie auch bei hastiger Bedienung „sanft" ansprechen. Das bewirkt die natürliche Reaktions-Trägheit der Lämpchen, die nicht schlagartig heller oder dunkler brennen, sondern deren Glühfäden mit ganz geringer Verzögerung ihre Lichtstärke ändern.

Die in Bild 17 genannten Werte passen zu einem Transistor-Vorverstärker mit mittelohmigem Ausgang (rund 1000 Ω), sie arbeiten gleichgut hinter einem Katodenausgang nach Bild 14 (linkes System).

In einer von Philips ausgeführten Großanlage, bei der sich in der Zentrale die Saalregler auf zahlreiche verschiedene Kanäle (je nach Betriebsart) aufschalten lassen, wurde ein weiterer Kniff angewendet. Theoretisch können zwar die Fernbedienungs-Leitungen beliebig lang sein, aber man muß ihren Drahtquerschnitt immerhin so bemessen, daß sie den vollen Lämpchenstrom wenigstens nahezu ungeschwächt durchlassen (Leitungswiderstand). Diese Forderung kann zu Schwierigkeiten führen, wenn man in sehr großen Saalbauten aus Gründen der Kostensenkung die dünnen Drähte vieladriger Signalkabel mitbenutzen will. Für diesen Zweck entwickelte Philips die Schaltung nach **Bild 18**, bei der der Lämpchenstrom nicht unmittelbar vom Saalregler (Fernbedienung), sondern vom Transistor AC 128 beeinflußt wird. In der Drahtleitung D fließt jetzt nur noch der äußerst niedrige Steuerstrom für den Transistor. Als Fotowider-

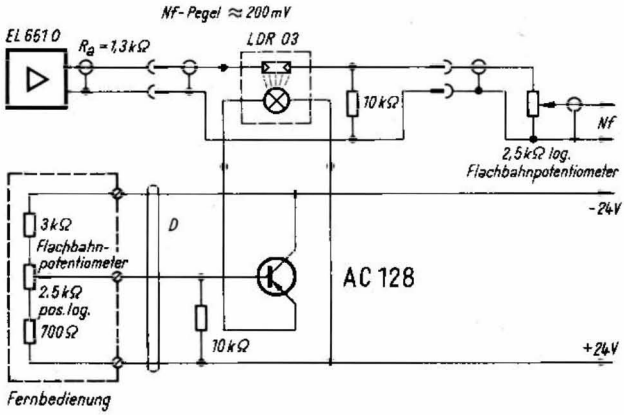


Bild 18. Anordnung einer Ferneinstellung mit Fotowiderstand

stände wurde für beide Schaltungen vom Verfasser die Type LDR 03 von Valvo erprobt.

In diesem Zusammenhang sei noch auf weitere Schaltungen mit Fotowiderständen zur Lautstärke-Ferneinstellung verwiesen, mit denen sich der Verstärker-Praktiker manche Aufgabenstellung erheblich vereinfachen kann. Häufig müssen bei größeren Veranstaltungen im Zuhörerraum mehrere Diskussionsmikrofone aufgestellt werden. In der herkömmlichen Schaltungstechnik laufen die einzelnen Mikrofonleitungen beim Diskussionsleiter nach **Bild 19** in einem dicken Kabelbündel zusammen. Dieser schaltet die gerade gewünschte Sprechstelle M durch Druck auf eine der Tasten T auf die Verstärkeranlage V. Der arme Mann ist um seine Arbeit nicht zu beneiden, denn wenn er niemanden benachteiligen will, muß er gleichzeitig alle Sprechstellen im Auge behalten. Deshalb führte man bald noch zusätzliche „Wortmeldetasten" für ein Lichtsignal an den Mikrofonen M ein, so daß der Diskussionsleiter wenigstens wußte, wer sich zuerst meldete. Durch ein Leuchtzeichen in umgekehrter Richtung wurde dem jeweiligen Sprecher zurückgemeldet, wenn sein Mikrofon sprechbereit ist. Dadurch kamen noch mindestens drei Signaladern zu jeder Mikrofonleitung hinzu, auf die man kaum verzichten kann.

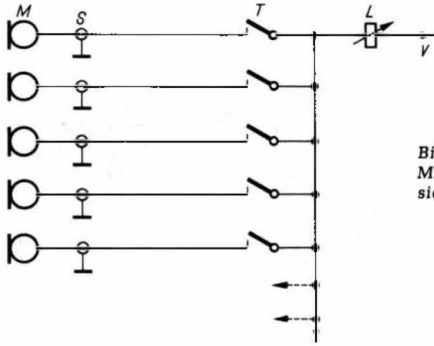


Bild 19. Blockschaltung des Mikrofonnetzes einer Diskussionsanlage in herkömmlicher Technik

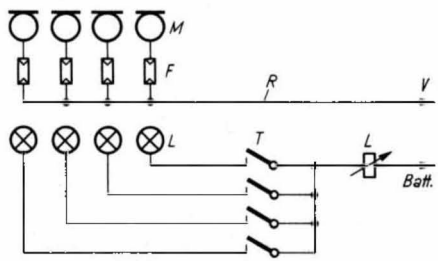


Bild 20. Diskussions-Mikrofonnetz mit Fotowiderständen

Was das bei fliegend aufgebauten Mietanlagen für Installationsarbeit verursacht, kann man sich leicht ausmalen.

Schaltet man die Mikrofone dagegen über Fotowiderstände ein und aus, so führt das zunächst im Mikrofonkabel-Netz zu einer ganz gewaltigen Vereinfachung. Nach **Bild 20** liegen jetzt sämtliche Sprechermikrofone M über Fotowiderstände F in Parallelschaltung an einer einzigen Ringleitung R, die unmittelbar zum Verstärker V führt. Damit entfallen alle Tonfrequenzleitungen bis auf eine, die Installation wird viel billiger und die Betriebssicherheit steigt. Ein Mikrofon ist nur dann sprechbereit, wenn es der Veranstaltungsleiter durch Einschalten des zugehörigen Signallämpchens L „freischaltet". Dieses Lämpchen, das ohnehin unentbehrlich ist, beleuchtet gleichzeitig den Fotowiderstand F, und vor allem, das gesamte Lämpchen-Netz ist völlig getrennt von der Mikrofon-Ringleitung. Mit dem Lämpchen-Helligkeits-Einsteller L kann man bei Bedarf auch noch individuell die Lautstärke bestimmen.

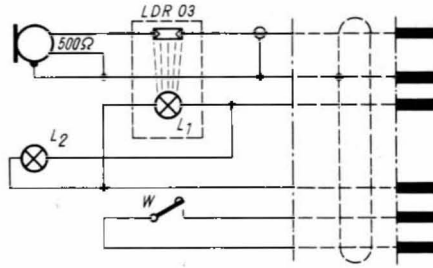


Bild 21. Innenschaltung eines Sprechermikrofons

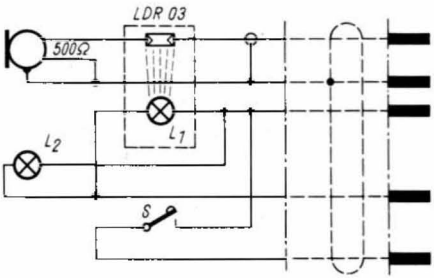


Bild 22. Innenschaltung eines vorzugsberechtigten Mikrofons

In einer praktisch ausgeführten Anlage (Meistersinger-Halle, Nürnberg) ist das Prinzip noch wesentlich verfeinert verwirklicht. **Bild 21** zeigt die Innenschaltung eines der zahlreichen Sprechermikrofone. Über die Wortmeldetaste W erbittet der Sprecher die Freischaltung seines Mikrofons, die der Versammlungsleiter über die Lampe L_1 bewirkt. Mit dem parallel geschalteten Lämpchen L_2 hat es folgende Bewandtnis: Zwar könnte man L_1 so am Mikrofongehäuse anbringen, daß es sowohl den Fotowiderstand LDR 03 im Innern beleuchtet und auch nach außen als Signal erkennbar ist, aber dabei kann Fremdlicht (z. B. Scheinwerfer bei Filmaufnahmen) zu einem ungewollten leichten Auftasten des Mikrofonkreises führen. Das vermeidet man lieber durch lichtdichten Einbau von L_1.

Eine weitere Besonderheit zeigt **Bild 22** mit der Sonderschaltung für vorzugsberechtigte Mikrofone am Tisch des Versammlungsleiters. Ein Druck auf die Sprechtaste S legt die Lämpchen unmittelbar an die Brennspannung, wodurch man sich auch ohne Vermittlung der Regie sofort in die Diskussion einschalten kann.

3.4 Tonabnehmerverstärker

Aus Gründen einer möglichst langen Spieldauer (=geringer Rillenabstand) und eines günstigen Signal- zu Störverhältnisses (hohe Lautstärke der Aufzeichnung) werden bei der Aufzeichnung absichtlich die Tiefen abgeschwächt und die Höhen angehoben. Täte man das nicht, dann würden die kräftigen Auslenkungen bei den Bässen einen ungewöhnlich großen Rillenabstand fordern (= kürzere Laufzeit), und die Höhen gingen im unvermeidlichen Nadelrauschen unter. Diese beabsichtigte Aufnahme-„Verzerrung" (= Schneidkennlinie) läßt sich — falls überhaupt nötig — beim Wiedergeben durch verhältnismäßig einfache RC-Glieder rückgängig machen, wodurch man die erzielten Vorteile recht billig einhandelt.

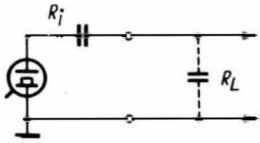
Wir wollen an dieser Stelle nicht auf die vielfältigen Zusammenhänge eingehen und nur kurz andeuten, daß es in früheren Jahren eine Vielzahl von Schneidkennlinien nebeneinander gab. Im Prinzip hatten sie zwar alle die gleiche Tendenz und verliefen als Frequenzkurve gezeichnet von links unten nach rechts oben. Die beiden Übergangsfrequenzen (= Beginn des Tiefenabfalls und des Höhenanstiegs) lagen an unterschiedlichen Punkten. Inzwischen hat sich eine weltweite Annäherung eingestellt, weshalb man bei nicht gerade überspitzten Ansprüchen mit einer einzigen nicht umschaltbaren Wiedergabeentzerrung auskommt. Die Schneidkennlinien erinnern sehr stark an eine zur Frequenzskala im Winkel von 45° geneigte Gerade.

Nun arbeiten allerdings die beiden großen Gruppen der heute gebräuchlichen Tonabnehmer (Kristall- und Keramiksysteme bzw. magnetische oder dynamische Typen) grundverschieden. Die zuerst genannte Gruppe liefert dann frequenzgerade Spannungen, wenn die Aufzeichnung mit konstanter Schnelle (= Geschwindigkeitsamplitude) erfolgte, die andere, wenn konstante Auslenkung vorliegen würde. Weil das ein bißchen kompliziert klingt, wollen wir es lieber gleich in einfaches Praktiker-Deutsch übersetzen: Kristall- und Keramiksysteme machen also schon von Haus aus die Schneidkennlinie rückgängig. Sie brauchen keine zusätzliche Entzerrung, und weil sie rund 500 mV Tonspannung abgeben, ist noch nicht einmal eine zusätzliche Vorröhre erforderlich. Das ist der Grund für ihre große Be-

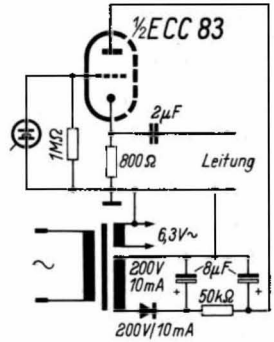
liebtheit und für ihre weite Verbreitung. Wenn nicht alles trügt, werden schon bald Typen höchster Qualität auf den Markt kommen, die vielleicht eines Tages die dynamischen und magnetischen Ausführungen ablösen. Dann braucht man sich möglicherweise über das in der Überschrift genannte Thema gar nicht mehr zu unterhalten.

Zur Zeit wird jedoch die Spitzenklasse noch immer von magnetisch/dynamischen Tonabnehmern angeführt. Diese geben nicht nur grundsätzlich sehr viel weniger Tonspannung ab, sondern sie arbeiten noch dazu nur dann frequenzlinear, wenn die Aufzeichnung mit konstanter Auslenkung erfolgt wäre. Weil letzteres nicht der Fall ist, braucht man eine Entzerrung. Diese wird praktisch stets in den außerdem erforderlichen Vorverstärker eingebaut.

Damit die Bäume nicht in den Himmel wachsen, sei an eine grundsätzliche Schwäche der Kristalltonabnehmer erinnert: Ihr Innenwiderstand hat kapazitiven Charakter und er ist sehr hochohmig (rund 1 MΩ). Damit wird die abgehende Leitung (weil hochohmig) recht brummanfällig, und sie soll daher nur kurz sein. Dann bietet sie nämlich vagabundierenden Störspannungen wenig Angriffsfläche. Diese Forderung ist bei der Wiedergabe im Heim immer zu erfüllen, und man kommt wohl überall mit der rund 1,5 m langen Anschlußschnur aus. In großen Übertragungsanlagen dagegen — besonders wenn sie *fliegend* aufgebaut werden — läßt sich diese Forderung manchmal sehr schwer erfüllen. Das ist recht schade, denn gerade bei Quellen (hier Tonabnehmer) mit kapazitivem Innenwiderstand verursacht die Leitungskapazität keine Höhenbeschneidung, sondern sie dämpft frequenzunabhängig (also gleichmäßig) den gesamten Tonbereich. Das erklärt **Bild 23** einleuchtend. Dem kapazitiven Innenwiderstand R_i liegt der Leitungswiderstand R_L als Last parallel, so daß beide Widerstände nach Art eines Potentiometers einen Spannungsteiler bilden und die Lautstärke herabsetzen. Natürlich würde ein einfacher Verstärker ohne Entzerrung, den man am Ende der Leitung (Pfeile) anordnet, den Verlust leicht wieder ausgleichen. Trotzdem ist und bleibt das ein riskantes Unternehmen, weil er auch die unvermeidlichen eingeschleppten Störungen mitverstärkt. Vielfach erprobt ist die in **Bild 24** ge-



Oben: Bild 23. Prinzip der Leitungsdämpfung bei einem Kristall-Tonabnehmer



Rechts: Bild 24. Impedanzwandler für Kristall-Tonabnehmer

zeigte Schaltung eines Röhren-Impedanzwandlers, der bei Übertragungsanlagen unmittelbar im Plattenspieler sitzt. Der dynamische Innenwiderstand der Leitung beträgt rund 300 Ω, und weil Tonspannungen in der Größenordnung von 500 mV und mehr anliegen (etwa wie beim Telefon), kommt man bei bescheideneren Längen (5...10 m) manchmal sogar ganz ohne Abschirmung, z. B. mit gewöhnlicher verseilter Lichtnetz-Litze, aus.

Noch ein Wort zum Aufbau: Als Netztransformator genügt die kleinste im Handel erhältliche Type für 1 × 200...250 V/10 mA, diesem Wert muß auch der Gleichrichter entsprechen.

Am Beispiel dieser und der nächsten Schaltung sei noch einmal auf Abschnitt 2 zurückverwiesen. Es zeigt sich nämlich, daß man manchmal ganz klar entscheiden kann, ob eine Röhren- oder eine Transistorschaltung „vernünftiger" ist. Bei dem Impedanzwandler nach Bild 24 verdient die Röhre den Vorzug. Ihr hoher Eingangswiderstand paßt ohne Kunstgriffe an den Kristalltonabnehmer, im Plattenspieler ist genügend Platz für die wenigen Bauelemente vorhanden, die mäßige Erwärmung spielt keine Rolle, und die Bauteile für die unerreicht einfache Schaltung finden sich in jedem Vorrat überzähligen Materials.

Bei mehrstufigen Tonabnehmer-Entzerrerverstärkern, insbesondere bei solchen für dynamische oder magnetische Stereo-Systeme, sieht es aber sofort ganz anders aus. Unter dem Plattenspieler findet sich kaum noch Platz für z. B. vier Röhren und den Netzteil, von der Erwärmung ganz zu schweigen. Hier erweist sich ein Transistorverstärker nach **Bild 25** als sehr viel zweck-

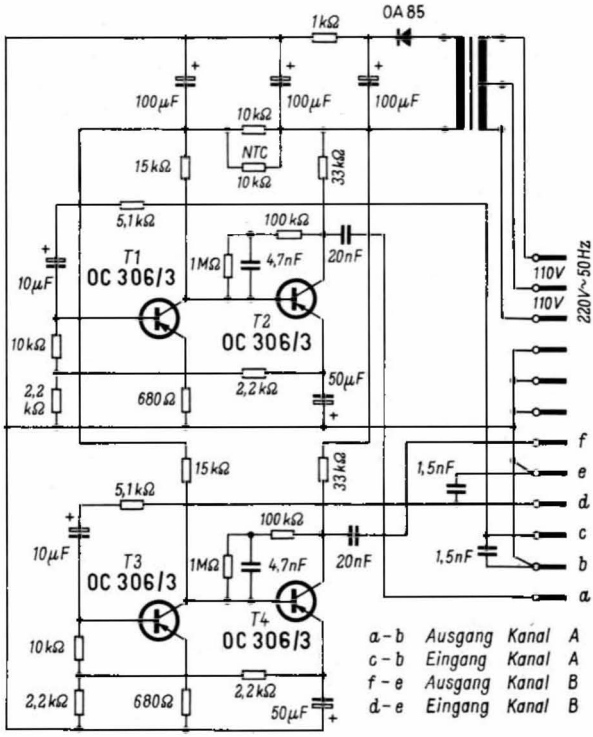


Bild 25. Grundschaltung des Entzerrerverstärkers PV 8 C von Elac

mäßiger. Hinzu kommt, daß er zusammen mit dem Laufwerk ein- und ausgeschaltet werden kann, denn er braucht keine Anheizzeit. Nach außen tritt er also überhaupt nicht in Erscheinung.

Die Entzerrung erfolgt ebenso einfach wie wohlüberlegt: In der zweiten Stufe bewirken die Gegenkopplungsglieder 100 kΩ/1 MΩ/4,7 nF die erforderliche Tiefenanhebung unterhalb 1000 Hz. Die Höhenabsenkung oberhalb von 1 kHz besorgt automatisch die Eingangsschaltung, sie bedämpft die Hochtonwiedergabe des vorgeschalteten Tonabnehmers im richtigen Verhältnis. Eine weitere Aufgabe übernehmen die Auskopplungskondensatoren von je 20 nF an den beiden Kollektoren der zweiten Stufen: Zu-

sammen mit den üblichen Abschlußwiderständen von rund 330 kΩ (= Eingangswiderstand des Hauptverstärkers) bilden sie Hochpässe, die die Frequenzen unterhalb 100 Hz leicht dämpfen und unerwünschtes Rumpeln unterdrücken (Verbessern des tieffrequenten Störspannungs-Verhältnisses).

Der Verfasser hat diesen Vorverstärker für seine Zwecke durch Einlöten von zwei weiteren Transistoren noch weiter modifiziert. Diese machen den Ausgang niederohmig und erlauben z. B. direkten Anschluß eines Stereo-Kopfhörers oder recht langer Leitungen. **Bild 26** zeigt die Schaltung für einen Kanal. Die zufällig vorhandenen Transistoren OC 71 arbeiten im Versuchsmuster als Impedanzwandler. Ihre Basis-Anschlüsse liegen unmittelbar an den Kollektoren der zweiten Stufen (T 2 und T 4), die Kollektoren liegen am Minus-Anschluß des Ladekondensators, und das kalte Ende der Emitterwiderstände von je 2 kΩ steht mit dem allgemeinen Nullpunkt (Plus-Spannung) in Verbindung. Über je 10 µF wird die Tonspannung beider Kanäle niederohmig herausgeführt.

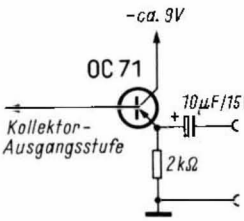


Bild 26. Niederohmiger Ausgang zur Schaltung von Bild 25

3.5 Magnettonverstärker

Wer nicht gerade Tonbandspezialist ist, dem erscheinen die Schaltungen von Magnettonverstärkern wie ein geheimnisvolles Buch mit sieben Siegeln, und zwar auch dann, wenn er in der allgemeinen Verstärkertechnik recht gut Bescheid weiß. Wie kommt das?

In der Hauptsache hängt es damit zusammen, daß preiswerte Heimgeräte für Aufsprechen und Wiedergabe die gleichen Röhren oder Transistoren und den gleichen Kopf (A-W- oder Verbundkopf) benutzen. Das erfordert eine umfangreiche *Umschaltung*. Einmal muß der Magnetkopf am Verstärkereingang (= Wiedergabe), dann wieder am Ausgang des Verstärkers (= Aufnahme bzw. Aufsprechen) liegen. Gleichzeitig wird die Entzerrung mit umgeschaltet. Verfügt das Gerät über mehrere Band-

geschwindigkeiten, dann wird noch zusätzlich eine weitere Umschaltung der Entzerrungsglieder erforderlich, da sich ihre Bemessung nach der gerade eingestellten Bandgeschwindigkeit richtet. Auf diese Weise kommt ein ganzer „Wald" von Umschalterkontakten zusammen, der noch größer wird, wenn zusätzlich verschiedene Normen (z. B. CCIR, NAB) Berücksichtigung finden müssen.

Am besten erinnert man sich zunächst einmal an die physikalischen Zusammenhänge, wobei eine gewisse Vereinfachung erlaubt sei: Ein konstant magnetisiertes Frequenz-Meßband ruft bei der Wiedergabe am Hörkopf leider keine proportionale Wiedergabespannung hervor. Würde man eine Frequenzkurve zeichnen, dann erhielte man – beginnend bei den Bässen – zunächst eine nach oben rechts geneigte Gerade, die bei einigen Kilohertz nach rechts sich krümmt, dann einen „Buckel" bildet und schließlich steil nach unten abfällt. Die Lage des Buckels richtet sich nach der Bandgeschwindigkeit, der Kopfspaltbreite und zum Teil auch nach dem Bandmaterial.

Will man die Kurve linearisieren, dann erfordert das vor dem Buckel eine Tiefen- und dahinter eine Höhenanhebung. Die notwendigen Anhebungswerte kann man zwar erzielen, aber ... Die Höhenanhebung, die sehr kräftig sein muß, bereitet einigen Kummer. Sehr leicht wird auch das unvermeidliche Eigenrauschen der Vorstufen mitverstärkt. Um das zu vermeiden, hebt man beim Wiedergeben die Tiefen voll, die Höhen nur zum Teil an. Die restliche Höhenanhebung wird in den Aufsprechverstärker verlegt.

Wer sich in die Schaltungstechnik von Magnettonverstärkern einarbeiten möchte, beginnt am besten mit dem Studium von zwei älteren getrennten Wiedergabe- und Aufsprechverstärkern mit Röhrenbestückung. Sie vermitteln nämlich am schnellsten einen guten Überblick. In dem Wiedergabeverstärker in **Bild 27** erkennt man zwei Gegenkopplungszweige (stark gezeichnet). In der ersten Stufe entsteht die gewünschte Tiefenanhebung, wobei der Trimmkondensator die Lage der Frequenz vor dem Bukkel (in der Kennlinie) bestimmt und der Trimmwiderstand den Grad der Baßanhebung. In der zweiten Stufe siebt der Trimmer „Höhenabgleich" hohe Frequenzen aus dem Gegenkopplungs-

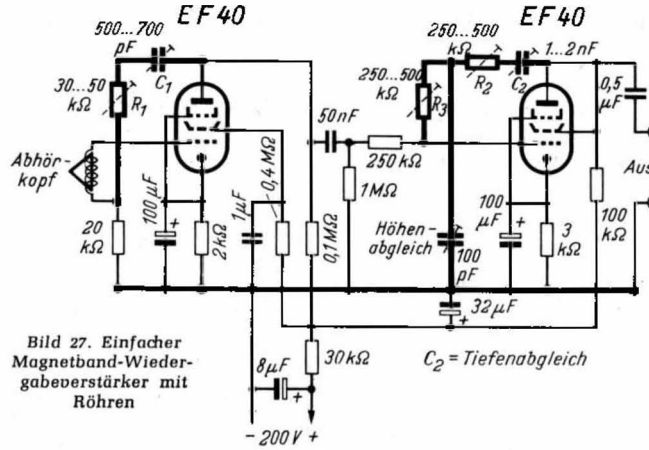


Bild 27. Einfacher Magnetband-Wiedergabeverstärker mit Röhren

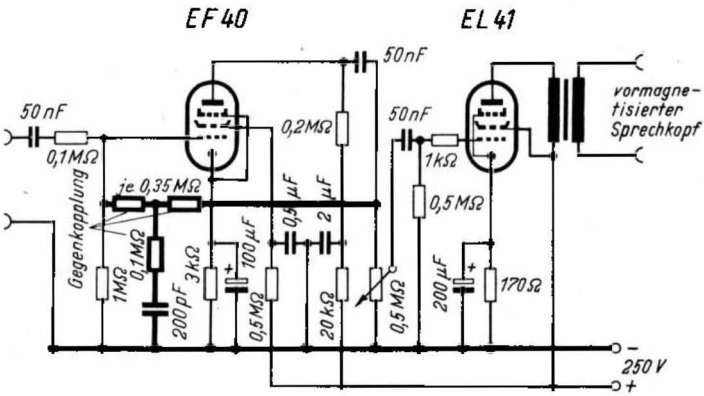
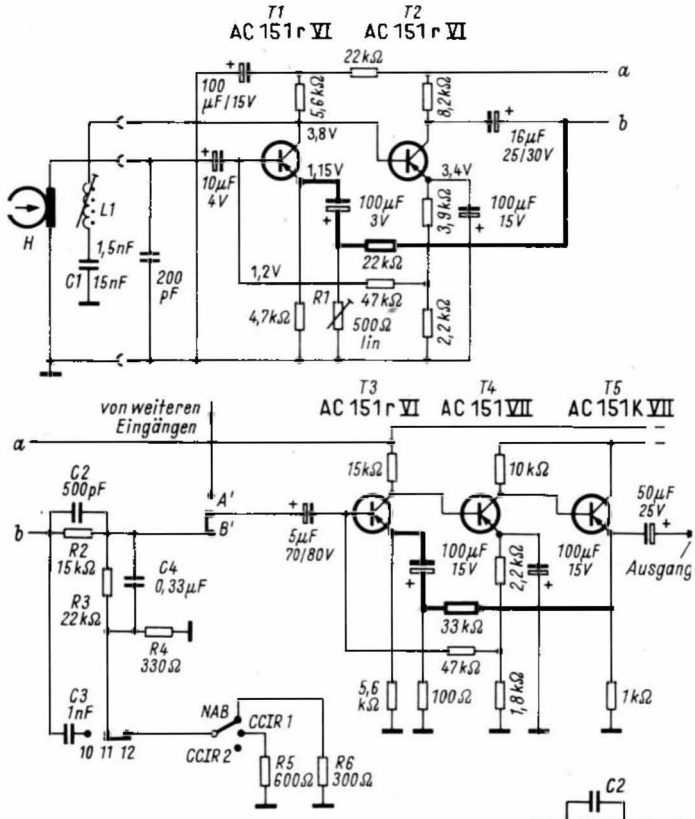


Bild 28. Einfacher Magnetton-Aufsprechverstärker mit Röhren

weg heraus, diese werden also mehr verstärkt als die Tiefen, es entsteht die erforderliche Anhebung. Auch hier läßt sich durch Trimmglieder die Kurvenform beeinflussen.

In der ersten Stufe des Aufsprechverstärkers (**Bild 28**) ist wieder ein Gegenkopplungszweig (stark gezeichnet) zu erkennen. Hier filtert das nach Masse geschaltete RC-Glied die Höhen her-



Oben: Bild 29. Magnetton-Wiedergabeverstärker mit Transistoren

Rechts: Bild 30. Prinzip des passiven Entzerrer-Netzwerkes von Bild 29

aus, wodurch diese zwischen 4000 und 10 000 Hz eine kräftige Anhebung erfahren.

In modernen Spitzengeräten, die fast ausnahmslos mit Transistoren bestückt sind, findet man heute auch vielfach wieder ge-

trennte Verstärker. **Bild 29** zeigt einen Ausschnitt aus dem Stereo-Tonbandgerät Uher 22 Spezial, und zwar den Wiedergabeteil eines Kanals. An den Hörkopf H schließt sich rechts ein zweistufiger Vorverstärker an. Dieser verstärkt jedoch frequenzunabhängig, denn der im stark gezeichneten Gegenkopplungsweg liegende Elektrolytkondensator hat einen so hohen Wert (100 µF), daß er alle Frequenzen ungeschwächt an den ersten Emitter zurückführt. Mit dem Trimmwiderstand R 1 wird die Gesamtverstärkung eingestellt (Abgleich beider Stereo-Kanäle), aber auch das erfolgt frequenzunabhängig. Der Sperrkreis L 1/C 1 leitet bei Multiplay-Effekten (Überspielen von einer Spur auf die andere) unerwünschte Einstreuungen vom Löschgenerator gegen Masse ab. Für Tonfrequenz ist er dagegen so hochohmig, daß er keinen Einfluß auf den Frequenzgang ausübt.

Die eigentliche Frequenzkorrektur, also die Wiedergabeentzerrung, übernimmt das anschließende passive Netzwerk R 2 bis R 6/C 2 bis C 4. Hier muß man schon einigermaßen überlegen, um die Arbeitsweise zu erkennen. Deshalb ist der wichtigste Teil in **Bild 30** getrennt dargestellt. An den drei Widerständen R 2/R 3/R 4 wird die Eingangsspannung geteilt, die Ausgangsspannung greift man zwischen R 2 und R 3 ab. Der Kondensator C 2 schließt seinen Parallelwiderstand für die Höhen nahezu kurz, so daß am Ausgang leicht angehobene Höhen zur Verfügung stehen. Auch Widerstand R 3 ist durch einen Parallelkondensator (C 4) überbrückt. Dieser leitet Höhen und Mittellagen ab und läßt nur die Tiefen ungeschwächt (Tiefenanhebung).

In Bild 29 erschweren zunächst die beiden Umschalter das weitere Verfolgen der Entzerrer-Arbeitsweise. Die Kontakte 10/11/12 sind mit dem Bandgeschwindigkeitsumschalter gekoppelt. In der gezeichneten Stellung für 19 cm/sec kann noch zusätzlich von Hand der Wert vom Widerstand R 4 durch Parallelschalten von R 5 oder R 6 und damit die Entzerrung leicht geändert werden. In Schalterstellung 9,5 cm/sec (10/11 geschlossen) ist dagegen die zuletzt genannte Umschaltung außer Betrieb, dafür liegt jetzt der Kondensator C 3 parallel zum Glied R 2/C 2, wodurch eine stärkere Höhen-Voranhebung erfolgt.

Rechts an den Entzerrer schließt sich ein weiterer dreistufiger Verstärker an, der zum Geräte-Ausgang bzw. zum Eingang der

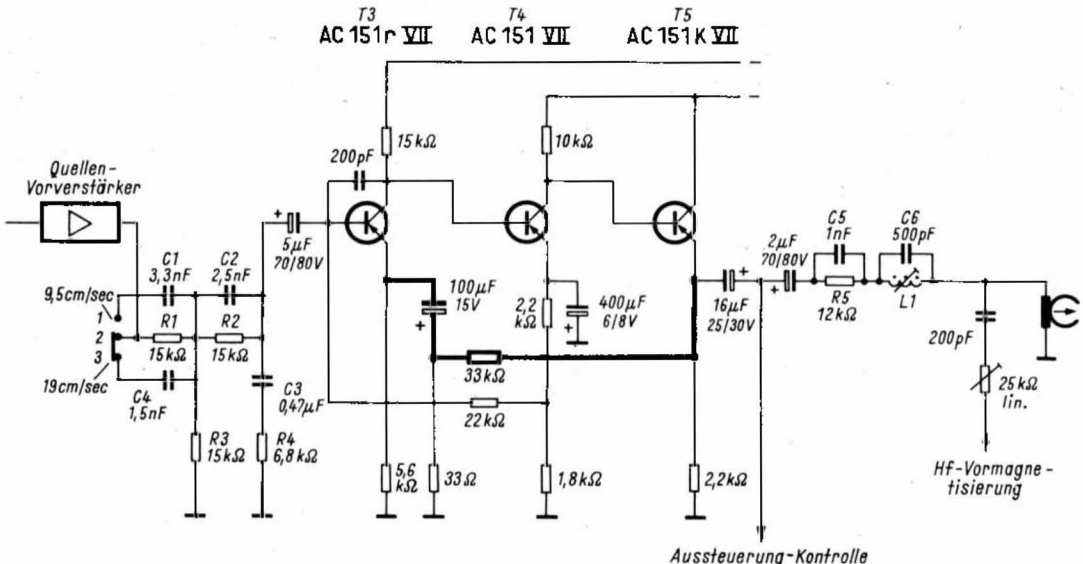


Bild 31. Magnetton-Aufsprechverstärker mit Transistoren

nachgeschalteten Hi-Fi-Anlage und bei Bedarf zu einem Kontrollkopfhörer führt. Sein Gegenkopplungszweig ist ebenfalls frequenzunabhängig ausgeführt. Der letzte Transistor (T 5) trägt nicht zur Verstärkung bei, er macht lediglich den Ausgang niederohmig (Impedanzwandler), um den Anschluß längerer Leitungen ohne Höhenverluste zu ermöglichen.

So vorinformiert versteht man auch schnell die Schaltung des Aufsprechverstärkers aus dem gleichen Gerät. Zwar ist sie ebenfalls vereinfacht in **Bild 31** dargestellt, aber alles Wesentliche ist klar zu erkennen. An den nur angedeuteten Quellen-Vorverstärker, der Mikrofon, Tonband und Schallplatte auf gleichen Pegel bringt, schließt sich wieder ein passiver Entzerrer an. In der gezeichneten Stellung (19 cm/sec) bilden die Glieder R 1/R 3 und R 2/R 4 Spannungsteiler, die die Kondensatoren C 4 und C 2 sowie C 3 frequenzunabhängig machen. Die Parallelkondensatoren C 4 und C 2 heben die Höhen stark an, während das Bauelement C 3 eine leichte Tiefenanhebung herbeiführt. Beim Umschalten auf 9,5 cm/sec verstärkt der Kondensator C 1 die Höhenanhebung.

Der anschließende dreistufige Verstärker ist wieder frequenzunabhängig gegengekoppelt (stark gezeichnet). Auch hier arbeitet der dritte Transistor als Impedanzwandler, der den Ausgang niederohmig macht. Der Sprechkopf ist über das RC-Glied R 5/ C 5 angeschlossen, dessen R-Teil (R 5) dafür sorgt, daß der Sprechkopf, der verhältnismäßig niederohmig ist, bei allen Frequenzen gleichen Strom zieht. Der Parallelkondensator C 5 bewirkt eine leichte Höhenanhebung. Schließlich sei noch auf den Sperrkreis L 1/ C 6 verwiesen, der das Einsickern von Hf-Resten aus dem Löschgenerator in den Verstärkerweg verhindert.

Die Schaltung eines kombinierten Aufnahme-Wiedergabe-Verstärkers erscheint zunächst viel komplizierter, sofern man jedoch die Zusammenhänge kennt, gewinnt man auch hier rasch den richtigen Überblick. Um Wiederholungen zu vermeiden, bittet der Verfasser, über eine Röhrenschaltung in Band 26 der Radio-Praktiker-Bücherei, Meß- und Schaltungspraxis für Heimton und Studio, Seite 20, nachzulesen. Eine vergleichbare Transistorschaltung zeigt **Bild 32**.

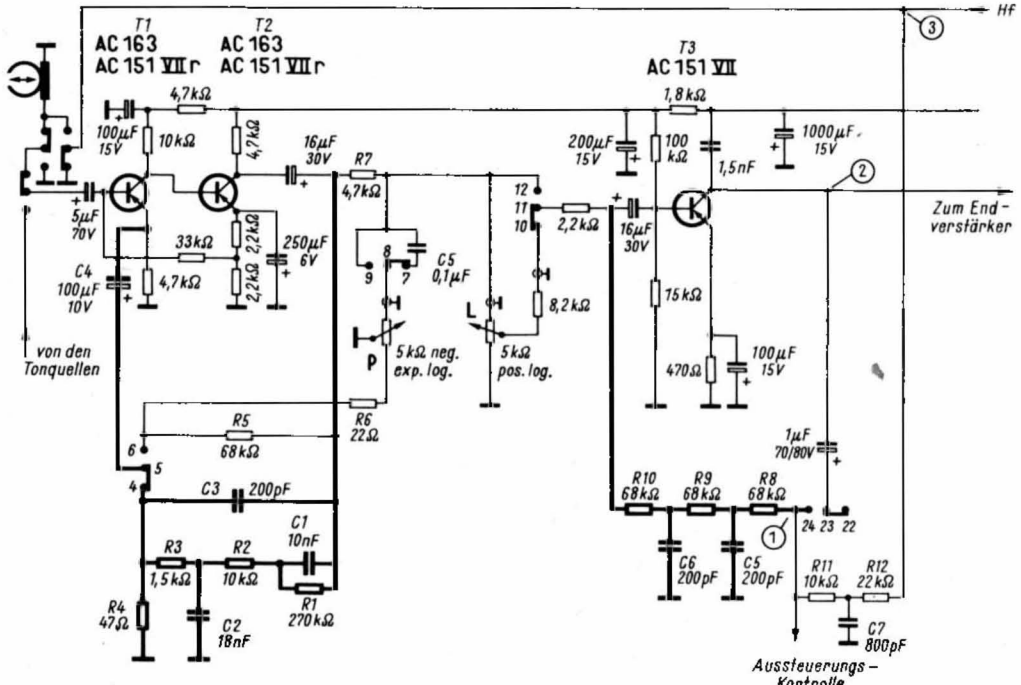


Bild 32. Kombinierter Magnetton-Aufsprech-Wiedergabeverstärker mit Transistoren (Uher)

Links im Bild ist der umschaltbare Verbundkopf zu erkennen, sein Umschalter (wie auch alle übrigen) steht in Wiedergabestellung. Er ist auf den Eingang der ersten beiden Transistorstufen geschaltet, die bei Wiedergabe über das Netzwerk R 1 bis R 4/C 1 bis C 4 frequenzabhängig gegengekoppelt sind. Der Kondensator C 1 sorgt für die Tiefenanhebung, der Widerstand R 1 und der Kondensator C 3 korrigieren die Kurvenform, während das Schaltelement C 2 eine leichte Höhenanhebung hervorruft.

Das Potentiometer P übt zwei Funktionen aus. Bei Wiedergabe bildet es zusammen mit dem Kondensator C 5 eine Tonblende, denn die Widerstände R 5 und R 6 sind so hochohmig, daß sie auch dann keinen Einfluß haben, wenn das Potentiometer am oberen Anschlag (in der Zeichnung!) steht. Zum Einstellen der Wiedergabelautstärke dient der Einsteller L. Der nächste Transistor (T 3) arbeitet beim Wiedergeben ohne Gegenkopplung, er verstärkt also nahezu linear. Von seinem Kollektor geht die Tonspannung über den Endverstärker zum Lautsprecher.

Beim Aufsprechen (= Aufnahme) liegen alle Umschalter in entgegengesetzter Stellung, zum Eingang gelangt also die Spannung der gerade eingestellten Programmquelle. Die Gegenkopplung von Transistor T 2 auf T 1 wird frequenzunabhängig, weil sie nur noch über den Widerstand R 5 fließt. Jetzt hat aber auch das Potentiometer P eine neue Aufgabe, es arbeitet nämlich als Pegeleinsteller für die Aufnahme. Der Lautstärkeeinsteller ist abgeschaltet. Das hat den Vorteil, daß man bei schnellem Wechsel zwischen Aufnahme und Wiedergabe — etwa bei Probeaufnahmen — beide Einsteller auf dem günstigsten Wert stehen lassen kann, was eine angenehme Bedienungsvereinfachung bildet. Wie arbeitet aber das Potentiometer P?

Beim Anschlag unten (in der Zeichnung) entzieht es dem Gegenkopplungsweg über die Widerstände R 5/R 6 Spannung. Die Gegenkopplung wird also geschwächt, und die Lautstärke nimmt zu. In der entgegengesetzten Einstellung belastet das Potentiometer den Längswiderstand R 7 so stark, daß im Extremfall überhaupt keine Spannung mehr zum Transistor T 3 gelangt.

Diese dritte Stufe ist in Aufnahmestellung über das Netzwerk R 8 bis R 10/C 5 und C 6 so gegengekoppelt, daß die erforder-

liche Höhenanhebung entsteht. Am Punkt ① zweigt der Kopf-Stromkreis über die Längswiderstände R 11 und R 12 ab, außerdem die Steuerspannung für die Aussteuerungskontrolle, und vom Punkt ② geht es über den Endverstärker zum eingebauten Lautsprecher. Das Glied R 12/C 7 erfüllt noch eine zusätzliche Aufgabe, es filtert die am Punkt ③ eingespeiste Hochfrequenz für den Kopf (= Vormagnetisierung) aus dem Verstärkerweg heraus.

3.6 Summen- und Trennverstärker

Großanlagen in Industriewerken und Sportstadien haben manches mit einem Rangierbahnhof gemeinsam. Die von vielen Gleisen kommenden Waggons werden zu neuen Zügen zusammengestellt und auf die abgehenden Strecken verteilt. Diese Arbeit übernehmen unscheinbare Rangierlokomotiven. Bei den Ela-Anlagen größeren Typs entsprechen die ankommenden Gleise den Tonfrequenzleitungen von Mikrofonen, Plattenspielern, Magnettongeräten und Rundfunkempfängern, die abgehenden Strecken sind die Leitungen zu den Endverstärkern mit angeschlossenen Lautsprechern oder auch Kabel zu weitabgelegenen Zweigstellen. Mit den Rangierlokomotiven kann man gut die Summen- und Trennverstärker vergleichen, die innerhalb der Zentrale für die zweckdienliche Weiterleitung und Verteilung der ankommenden Tonspannungen sorgen.

Hier sei eine kurze Einfügung erlaubt: Der Verfasser bemüht sich zwar redlich, die einzelnen Verstärkerbausteine in ihrer logischen Funktionsweise zu erläutern, weshalb auch mit den Quellenverstärkern (für Mikrofon, Fotozelle, Tonabnehmer usw.) begonnen wurde. Aber schon bei der Magnettontechnik war es angebracht, anschließend an den Wiedergabe- (= Quellenverstärker) auch gleich den Aufsprechverstärker (= Verbraucherverstärker) zu besprechen. Das hat die Übersicht erleichtert. Jetzt müssen wir eine ähnliche gedankliche Unkonsequenz in Kauf nehmen und zunächst auf das Erklären von Mischverstärkern verzichten, wir kommen darauf noch zurück. Soviel sei aber vorweggenommen: Durch das Zusammenschalten mehrerer Quellenverstärker über Mischpotentiometer auf einen sogenannten Summenkanal entsteht eine schaltungsbedingte Dämpfung, die der anschließende Summenverstärker wieder ausgleichen muß.

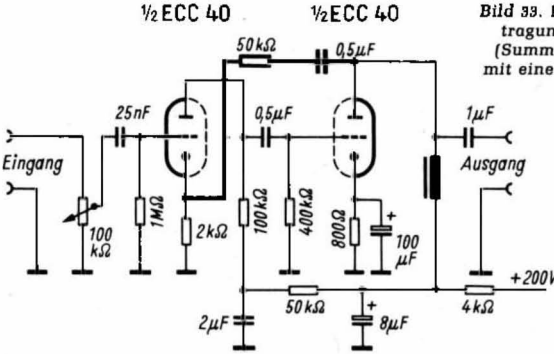


Bild 33. Einfacher Übertragungsverstärker (Summenverstärker) mit einer Doppeltriode

Einen solchen mit einer Doppelröhre bestückten Summenverstärker zeigt **Bild 33.** Die stark eingezeichnete Gegenkopplung macht das Gerät übersteuerungssicher und sie linearisiert den Frequenzverlauf. An den Ausgang lassen sich mehrere Endverstärker mit 100-kΩ-Eingängen parallel anschließen.

Bild 34 macht mit einem ähnlichen Baustein in Transistortechnik bekannt (Telefunken V 612), der aber noch zusätzlich getrennte Einsteller für die wahlweise Anhebung oder Absenkung der Höhen und Tiefen enthält. Wie es in größeren Anlagen üblich ist (für solche wurde das Gerät entwickelt), sind Ein- und Ausgang erdfrei gehalten und deshalb mit Übertragern versehen. Unmittelbar am Eingang befindet sich der Summeneinsteller S, dann folgen zwei Verstärkerstufen, hinter einem Übertrager schließt sich das Klangeinstellnetzwerk mit den Potentiometern H (Höhen) und T (Tiefen) an, und nach drei weiteren Verstärkerstufen folgt der Ausgangsübertrager. Die Emitterkreise des zweiten und fünften Transistors laufen über Sonderwicklungen der zugehörigen Übertrager. Dadurch entsteht eine Gegenkopplung, die den Frequenzverlauf linearisiert und die Übersteuerungsfestigkeit erhöht. Der Gleichrichter Gr 1 verhindert, daß bei versehentlich falscher Polung der Betriebsspannung (12 V) die Transistoren Schaden nehmen.

An die beiden Summenverstärker kann man zwar mehrere Endverstärker anschließen, und so verfährt man auch in der

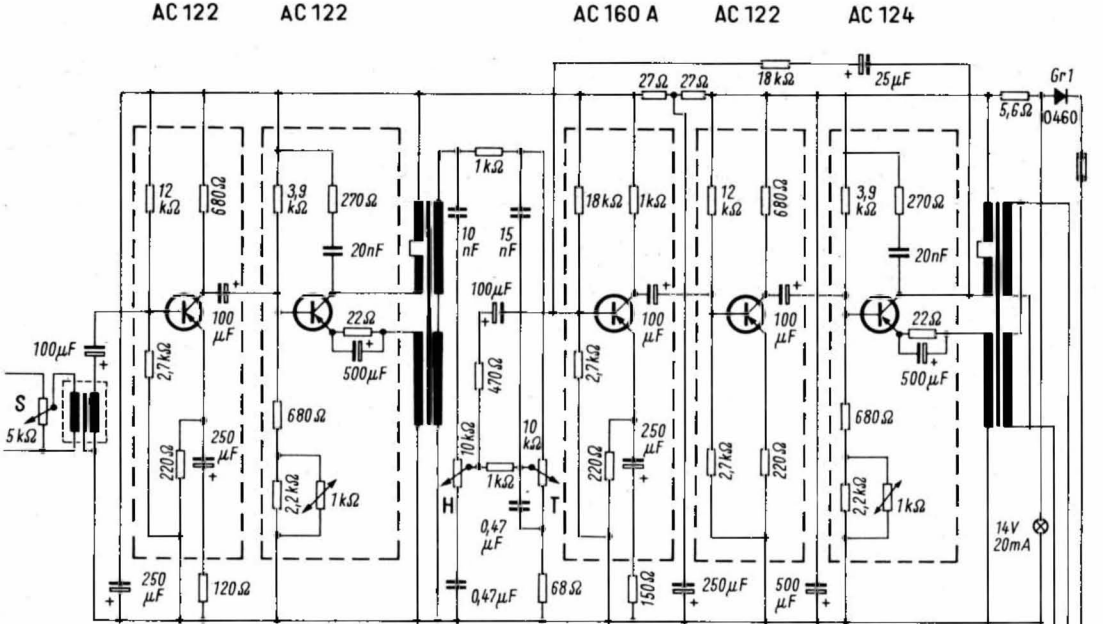


Bild 34. Summenverstärker V 612 von Telefunken

Regel, wenn sich diese in unmittelbarer Nachbarschaft, etwa in Wandgestellen im Regieraum, befinden. Kritisch wird es dagegen, wenn an den Summenverstärker-Ausgang auch Kabelleitungen angeschlossen sind, die in weit entfernte Nebenräume (Gaderoben, Werkhallen, Foyers) führen und erst dort an den Eingängen von Endverstärkern liegen. Der Kurzschluß einer einzigen Leitung setzt dann die gesamte Anlage außer Betrieb. Wer da etwa glaubt, ein solcher Fall zähle zu den Seltenheiten, der lasse sich durch ein Erlebnis vom Gegenteil überzeugen:

Am Heiligabend – der Christbaum wurde gerade angezündet – rief den Verfasser aufgeregt ein befreundeter Hotelier an. Er hatte das Haus voller Leute, und im Saal sollte gerade die große Weihnachtsfeier der Wintersport-Gäste beginnen, als plötzlich die Übertragungsanlage mit vierzig Lautsprechern verstummte. Man hatte sie vor wenigen Jahren neu und sehr ordentlich installiert und jedem Lautsprecher an Ort und Stelle seinen eigenen Endverstärker zugeordnet. Das war nötig, damit jeder einzelne Raum je nach Publikumsgeschmack die gerade gewünschte Lautstärke einstellen kann. Ein halb als Ring-, halb als Sternleitung verlegtes Netz zweigte hinter dem Summenverstärker ab. Der Fehler war in wenigen Minuten mit dem Kopfhörer eingekreist. Diagnose: Kurzschluß im Verteilernetz. Preisfrage: Wo? Mit sehr viel mehr Glück als Verstand fand ihn der Autor. Die Garderobefrau hatte sich – weil sie eben an diesem Tag auch arbeiten mußte und wenigstens ein bißchen „privates Weihnachten" feiern wollte, einen Tannenzweig neben ihr Schalterfenster genagelt. Sie hatte vorzüglich gezielt, denn der Nagel ging genau durch das hier ganz dicht unter Putz verlegte Summenkabel. Herausziehen half nichts, die beiden Adern waren noch zusätzlich mit der Abschirmung in Verbindung gekommen! Scheußlich! Hier gab es nur eine Rettung, denn die Zeit drängte: Meißel her! Ein Stück Putz herausschlagen! Das Kabel durchzwicken, abisolieren und mit zwei dreipoligen Lüsterklemmen die Schadenstelle überbrücken. Die Anlage arbeitete wieder, alles war hocherfreut. Aber fragen Sie nicht, liebe Leser, wie der Autor aussah ... sein dunkler Anzug hatte erheblich gelitten!

Solche Totalausfälle verhindern mit Sicherheit Trennverstärker, von denen **Bild 35** die Schaltung einer Röhrenausführung

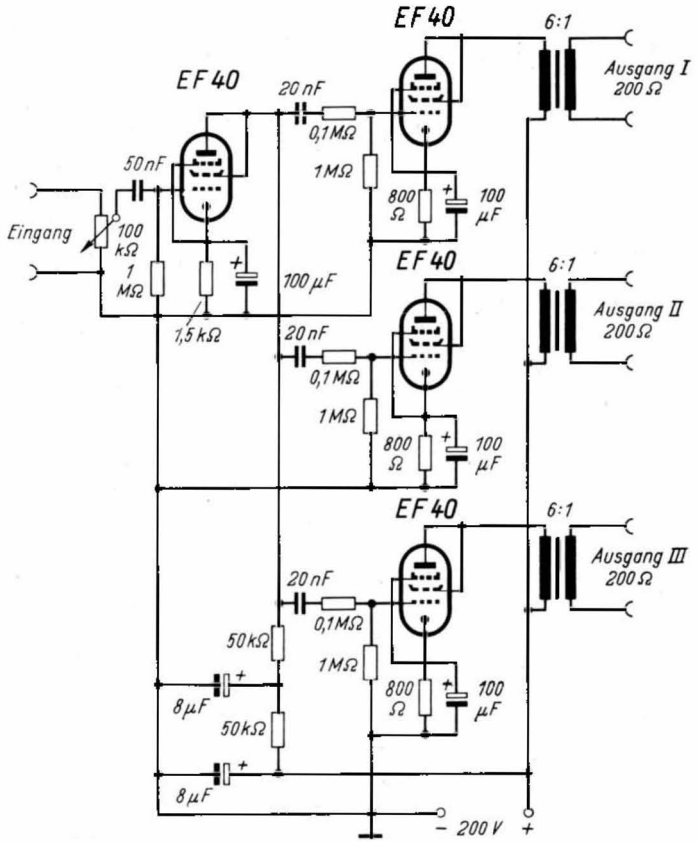


Bild 35. Trennverstärker zum Anschluß mehrerer Wiedergabeverstärker

zeigt. Hinter der Vorstufe zweigen in Parallelschaltung die Gitterkreise der Trennstufen ab, von denen jede einzelne von einer eigenen Triode gebildet wird. Die Ausgänge (Übertrager) sind voneinander völlig unabhängig. Ein Kurzschluß am Ausgang II kann also die anderen beiden Ausgänge überhaupt nicht in Mitleidenschaft ziehen, weil diese Kanäle durch ihre eigenen Röhren gegen den Eingang völlig entkoppelt sind.

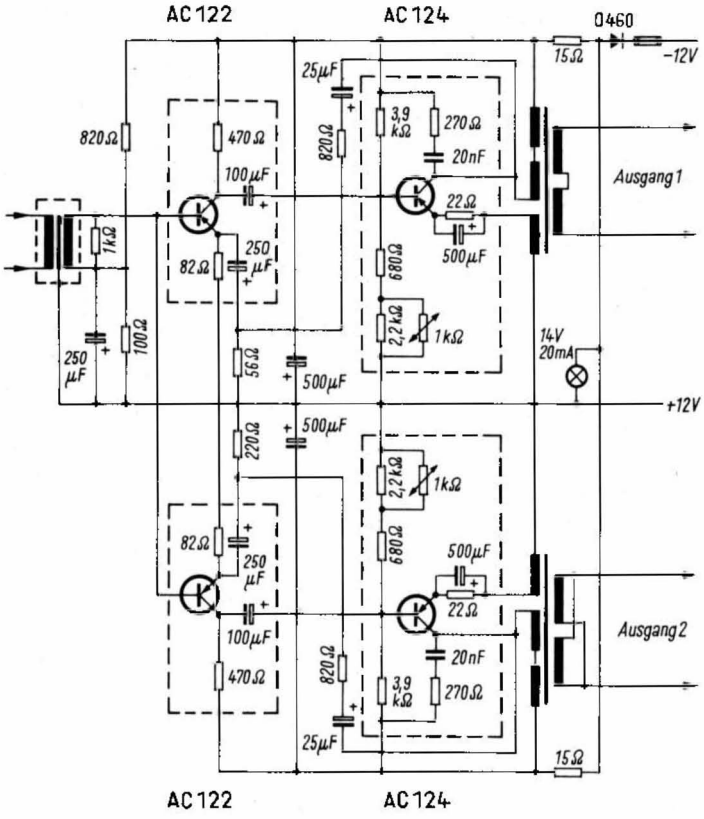


Bild 36. Transistor-Trennverstärker V 617/1 von Telefunken

Die gleiche Funktion übt der Transistor-Trennverstärker nach **Bild 36** aus. Wer die Schaltung aufmerksam studiert, wird bemerken, daß im oberen Kanal die beiden Sekundärwicklungen des Ausgangsübertragers in Reihe, beim unteren parallel geschaltet sind. Der obere Kanal ist für einen Abschluß mit 300 Ω, der untere für 75 Ω ausgelegt. Die Schaltung entspricht der des Telefunken-Verstärkers V 617/1.

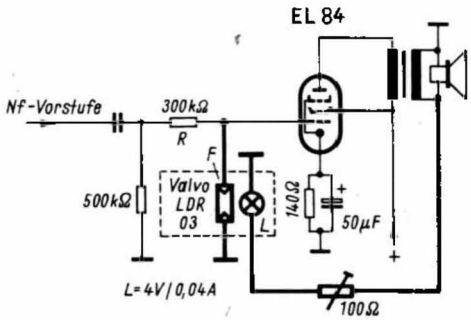


Bild 37. Einfache Dynamikbegrenzung mit Glühlampe und Fotowiderstand

3.7 Dynamikbegrenzer

In Übertragungs-Anlagen wird es bei Sprachdarbietungen als recht störend empfunden, daß man bei ungeübten Rednern fortwährend das Lautstärkepotentiometer nachstellen muß. Das erfordert eine zusätzliche Person für die Bedienung, die entweder ganz erhebliche Erfahrungen mitbringen oder ein halber Hellseher sein muß. Man kann ja kaum vorausahnen, ob sich nicht der Sprecher im nächsten Augenblick zum Mikrofon hinneigen und die Anlage übersteuern oder vielleicht nach der Seite sprechen und dann in den angeschlossenen Lautsprechern kaum mehr hörbar sein wird. Eine Automatik kann hier Abhilfe schaffen.

Bild 37 zeigt eine extrem einfache Anordnung, die recht anschaulich das Prinzip erläutert und die man für Versuchszwecke rasch einmal in einen einfachen Lautsprecherverstärker (z. B. Nf-Teil eines Rundfunkempfängers) einbauen kann. Im Gitterkreis der Endröhre liegt der Vorwiderstand R. Er bildet mit dem Fotowiderstand F einen Spannungsteiler. Der Fotowiderstand und das Lämpchen L (Fahrradrücklicht-Lampe) sitzen lichtdicht in einer Papphülse. Solange L dunkel bleibt, hat F einen fast unendlich hohen Widerstand, und weil auch der Eingangswiderstand der Röhre sehr hochohmig ist, übt der Vorwiderstand R keinen Einfluß aus. Bei zunehmender Lautstärke beginnt das Lämpchen zu glühen, wodurch der Fotowiderstand niederohmiger wird, den

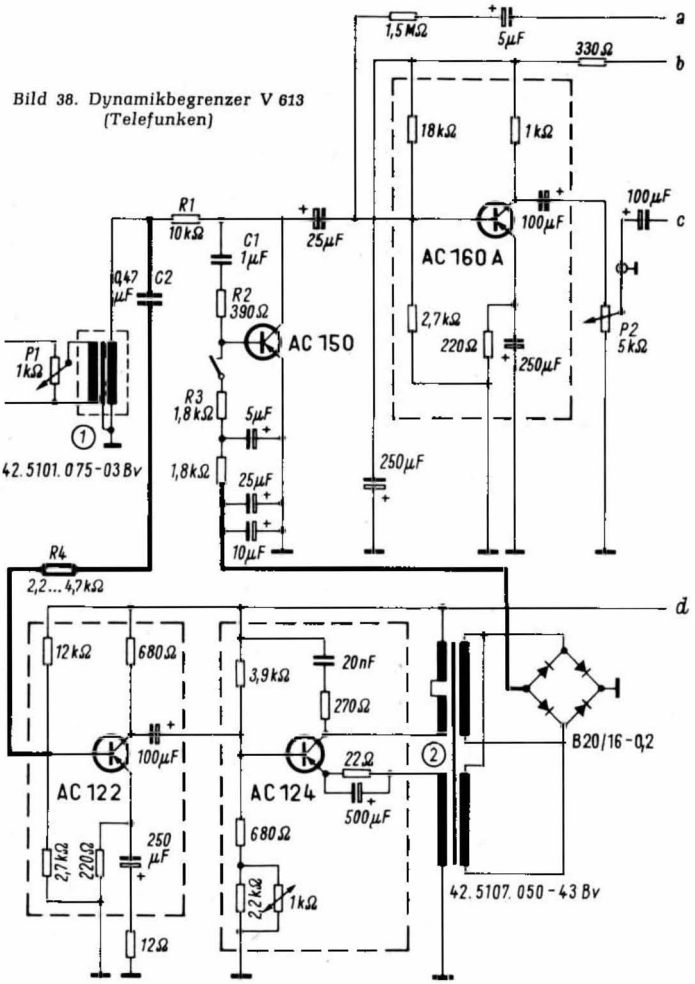
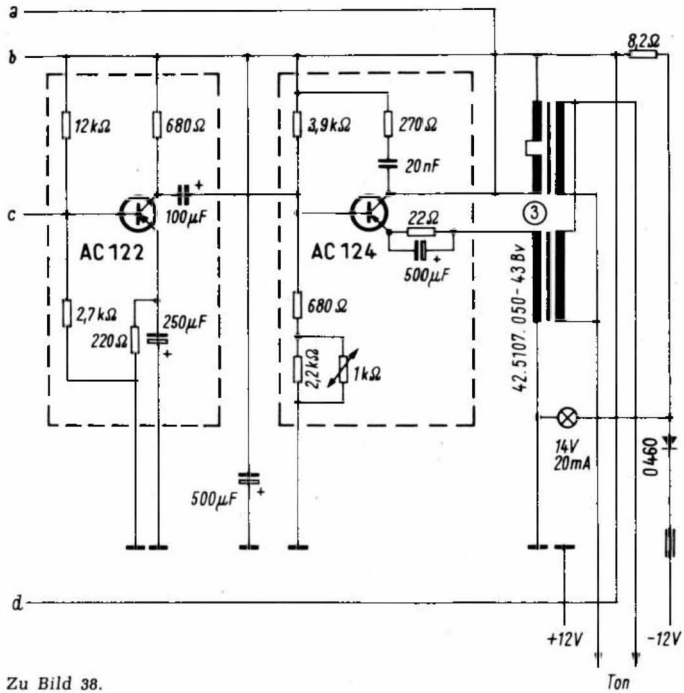


Bild 38. Dynamikbegrenzer V 613 (Telefunken)

Vorwiderstand R belastet und zusammen mit diesem wie ein automatisches Potentiometer die Lautstärke herabregelt. Mit dem 100-Ω-Trimmwiderstand lassen sich Ansprechschwelle und Re-



Zu Bild 38.

geltiefe auf den gewünschten Wert einstellen. Die Regelglieder sind in Bild 37 stark gezeichnet.

Nach einem ähnlichen Prinzip, nämlich mit gesteuerter Spannungsteilung, arbeitet der mit einem Dynamikbegrenzer ausgerüstete Transistorverstärker V 613 von Telefunken. Noch vor dem Vorwiderstand R 1 (**Bild 38**) zweigt über das Glied C 2/R 4 die Eingangsspannung für den Regelverstärker ab (stark gezeichnet). Sie wird in zwei Transistorstufen verstärkt und anschließend (Schalter bei R 3 geschlossen) zum Transistor AC 150 geführt. Dieser Transistor arbeitet als gesteuerter Widerstand, der zusammen mit dem Glied C 1/R 2 den Vorwiderstand R 1 lautstärkeabhängig belastet. Durch entsprechendes Einstellen der Potentiometer P 1 und P 2 erzielt man entweder oberhalb einer

bestimmten Mindestlautstärke eine konstante Wiedergabelautstärke oder eine in weiten Grenzen unbeeinflußte Dynamik, die erst kurz vor dem Übersteuerungspunkt eingeengt wird. Der Schalter muß in beiden Fällen geschlossen sein. Öffnet man ihn, dann arbeitet das Gerät wie ein normaler Vorverstärker.

3.8 Hallverstärker

In letzter Zeit sind in Verstärkeranlagen und noch mehr für den Heimgebrauch sogenannte *Halleinrichtungen* in Mode gekommen. Sie dienen dazu, der Wiedergabe künstlichen Hall zuzusetzen, was besonders in sehr „trocken" klingenden Räumen eine merkliche Verbesserung der Musikqualität hervorrufen kann. Wenn diese Geräte hier und da abgelehnt werden, so hängt das wohl damit zusammen, daß sie manche „Fans" übertrieben und auch dann anwenden, wenn man sie eigentlich gar nicht braucht. Mit Maß und Ziel benutzt — z. B. auch für Effekte im Amateurstudio — haben sie jedoch ihre unbestreitbaren Vorzüge.

Für die Verhallung von Darbietungen gibt es mehrere Möglichkeiten, die jedoch alle nach dem in **Bild 39** gezeigten Prinzip arbeiten. Im Zug einer Verstärkerschaltung wird am Eingang E einer Röhre ein Teil der Tonspannung abgezweigt und der Halleinrichtung zugeführt. Diese gibt ihn zeitverzögert über den Halleinsteller HE auf den Ausgang der Verstärkerstufe, wo sich der Hall mit der über die Röhre geleiteten unverzögerten Tonspannung mischt. Je weiter man das Potentiometer HE aufdreht, umso halliger klingt die Darbietung, in Nullstellung von HE fehlt der Hall und der Originalklang wird allein übertragen. Das etwas umständliche „Anzapfen" des Verstärkers bei den Punkten E und A ist nötig, um Rückwirkungen zu vermeiden. Die Röhre arbeitet zwischen den Punkten A und E wie ein Trennverstärker und verhindert, daß Hall wieder auf den Eingang gelangt, erneut verhallt wird und schließlich die Halleinrichtung in dauerndes Schwingen kommt.

Die Zeitverzögerung in der Halleinrichtung kann z. B. dadurch erfolgen, daß man nach **Bild 40** bei E einen Lautsprecherverstärker LV anschließt, der den Lautsprecher L speist. Wenn man den Lautsprecher in einen Kellerraum stellt oder auf einen langen

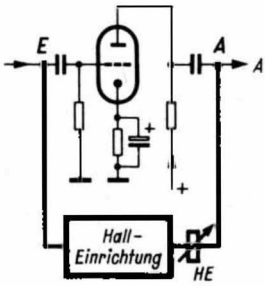


Bild 39. Prinzip einer Hallanordnung

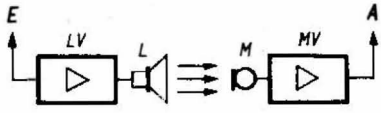


Bild 40. Prinzip der akustischen Verhallung

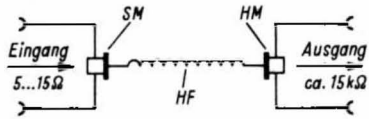


Bild 41. Prinzip der Hallfeder

Gang und seinen Schall wieder mit dem Mikrofon M aufnimmt, erhält man die gewünschte Verhallung. Der Mikrofonverstärker MV sorgt für den erforderlichen Pegel, der am Punkt A gebraucht wird. Dieses Verfahren ist natürlich mit viel Aufwand und Platzbedarf verbunden, aber es wurde trotzdem früher in den Studios der Sendeanstalten angewendet. Inzwischen hat man Magnettongeräte dazu herangezogen, wobei durch Verändern des Abstandes zwischen Aufsprech- und Wiedergabekopf die Verhallung ganz nach Wunsch eingestellt werden kann, aber auch das ist noch mit merklichem Aufwand verbunden. Viel handlicher sind bereits die etwa einen Quadratmeter großen Hallplatten der Rundfunkanstalten, die von einem Magnetsystem zum Schwingen im Rhythmus der Übertragung angeregt werden. Ein ähnlicher Magnet tastet auf der gegenüberliegenden Plattenseite diese Schwingungen zeitverzögert wieder ab.

Viel einfacher und handlicher sind jedoch für den Privatmann die inzwischen weit verbreiteten Hallfedern nach dem Hammond-Prinzip. Zwischen einem Sprechmagneten SM und einem Hörmagneten HM (**Bild 41**) sind nebeneinander zwei Hallfedern HF ausgespannt. Der Magnet SM erregt die beiden Schraubenfedern (oft fälschlich als Spiralfedern bezeichnet) zum Schwingen. Die Schwingungen gelangen verzögert zum Hörkopf HM und erzeugen in ihm entsprechende Tonschwingungen. Der Aufbau des ungefähr 20 cm × 6 cm × 2 cm großen Systems ist denkbar primitiv. Die Federenden dienen gleichzeitig als Magnet-

anker. Sie laufen also unmittelbar durch die Innenräume der beiden Magnetspulen.

Auch der dazu passende Verstärker ist sehr einfach aufgebaut (**Bild 42**), obwohl er genau besehen aus zwei getrennten Einheiten, nämlich dem Erregerteil mit der Röhre ECL 86 und dem Abhörteil mit der Doppeltriode ECC 83, besteht. Der Eingangs-Einsteller P 1 sorgt dafür, daß die Doppelröhre nicht übersteuert werden kann. Bei festem Einbau in eine bestimmte Anlage kann er auch durch einen Festspannungsteiler ersetzt werden. Das Triodensystem erzeugt sich seine Gittervorspannung durch Anlaufstrom an einem 10-MΩ-Gitterwiderstand. Der Katodenwiderstand des Endsystems kommt ohne Parallelkondensator aus, wodurch eine erwünschte Stromgegenkopplung entsteht, die die Stufe stabilisiert und den Frequenzverlauf linearisiert. Als Ausgangsübertrager eignet sich jede handelsübliche Ausführung für primär 12...17 kΩ und sekundär 5...15 Ω. Geringfügige Fehlanpassungen sind bedeutungslos, da ohnehin nur ein kleiner Teil der Endleistung (0,5...1 Watt) gebraucht wird und Beschneidungen an den Frequenzgrenzen sogar erwünscht sind. Deshalb verwendet man auch recht kleine Kopplungskondensatoren (5 nF).

Im Abhörteil sorgt eine ganz einfache Gegenkopplung (stark gezeichnet) für die erforderliche Stabilität und für einen niedrigen Ausgangswiderstand. Der Lautstärkeeinsteller P 2 kann je nach Wunsch für Schraubenzieherbetätigung eingerichtet oder mit einem Drehknopf versehen werden. Die zuletzt genannte Möglichkeit verdient den Vorzug, wenn man die Hallwirkung beliebig verändern möchte.

Zur Schaltung des einfachen Netzteiles ist wenig zu sagen, lediglich zu seinem Aufbau. Bevor man den Netztransformator festschraubt, sollte man sich überzeugen, daß er nicht magnetisch in den Hörmagneten HM einstrahlt und leichtes Brummen hervorruft. Entsprechendes Verdrehen seiner Achse schafft Abhilfe.

Weniger bekannt ist, daß man für einen Stereoverstärker nicht zwei Hallverstärker braucht, sondern ebenfalls mit einem einzigen auskommt. **Bild 43** zeigt, wie man den Verstärker nach Bild 42 in den Stereoweg einfügt. Dabei entkoppeln die Widerstände R 1/R 2 den Hallverstärker-Eingang gegen die beiden Kanäle, und das Widerstandspaar R 3/R 4 erfüllt ausgangsseitig

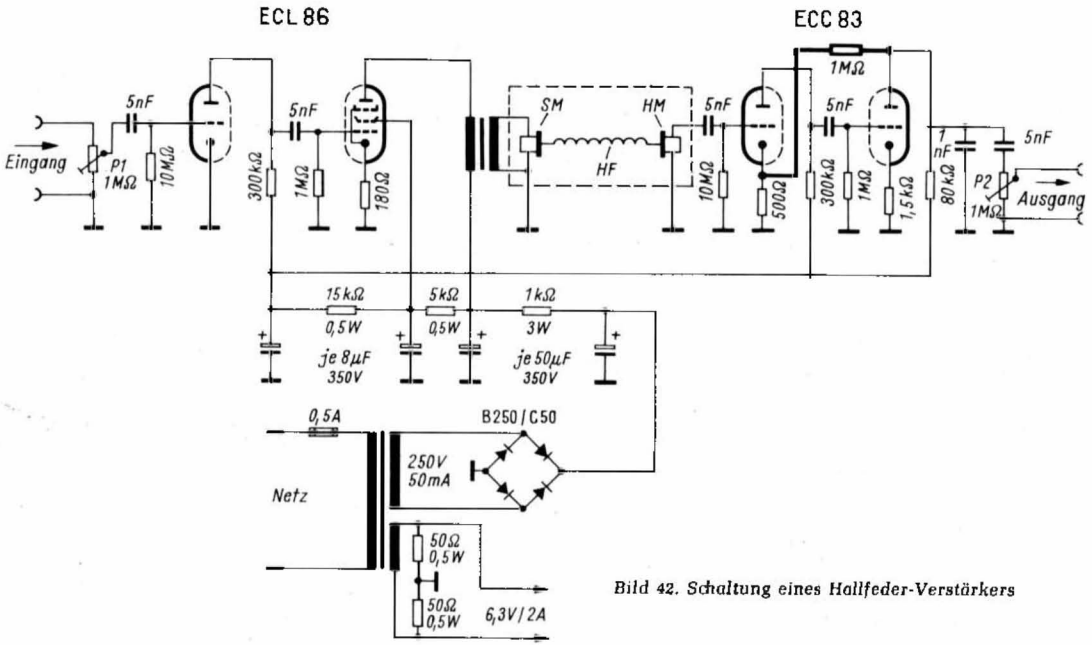
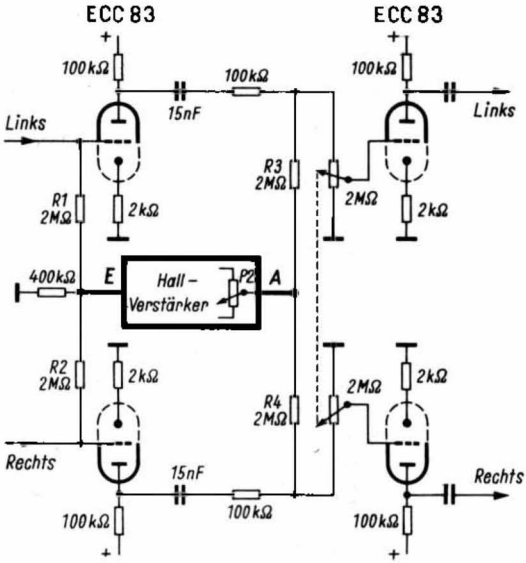
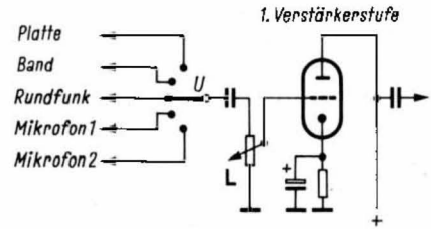


Bild 42. Schaltung eines Hallfeder-Verstärkers



Oben: Bild 43. Ein Hallverstärker genügt für zwei Stereokanäle



Rechts: Bild 44. Prinzip der Verstärker-Eingangsumschaltung

die gleiche Aufgabe. Mit dem Potentiometer P 2 läßt sich der Grad der Verhallung bestimmen.

3.9 Mischpulte und Steuergeräte

Nur in seltenen Ausnahmefällen überträgt ein Verstärker stets die gleiche Darbietungsart (z. B. Rufverstärker, Musikboxverstärker). Viel häufiger ist sein Eingang auf alle möglichen Tonspannungsquellen umschaltbar ausgebildet, etwa so, wie es **Bild 44** zeigt. Tatsächlich sind die meisten Heimverstärker und auch viele

Kraftverstärker für Übertragungsanlagen mit einem solchen Umschalter ausgerüstet. Bei einigem Nachdenken merkt man sofort, worauf es bei dieser einfachen Art der Umschaltung ankommt: Sie ist nämlich nur dann verwendbar, wenn alle vorgeschalteten Tonspannungsquellen ungefähr gleiche Spannungen an den Umschalter U abgeben. Ist das nicht der Fall, dann wird das Bedienen des Lautstärkeeinstellers L zur Fingerakrobatik. Bei lauten Quellen (z. B. Tonabnehmer) darf man ihn für eine bestimmte Höchstlautstärke nur ein ganz klein wenig aufdrehen, während leise Quellen (z. B. Mikrofone) auch bei voll geöffnetem Potentiometer noch immer zu leise übertragen werden. Deshalb verlangen Mikrofone stets vor dem Umschalter einen getrennten oder einen in das angeschlossene Gerät eingebauten Vorverstärker. Dieser schafft wenigstens ungefähr gleiche Pegelverhältnisse am Eingangsumschalter. Trotzdem wird man beim Durchdrehen des Umschalters noch immer starke Lautstärkesprünge beobachten. Diese lassen sich durch sogenannte Pegel-Voreinsteller ausgleichen. Dazu dienen die in **Bild 45** eingezeichneten Trimmpotentiometer V 1 bis V 5, die bei Inbetriebnahme des Verstärkers mit dem Schraubenzieher eingestellt werden müssen. Gleichzeitig sind in den beiden Mikrofonkanälen die zugehörigen Vorstufen zu erkennen.

Die beschriebene Eingangsumschaltung arbeitet leider nur nach dem Entweder-Oder-System, mit anderen Worten, man kann entweder dieses oder jenes Programm übertragen, und es ist nicht möglich, zwei miteinander zu mischen. Gerade das wird aber oft verlangt, etwa um einen gesprochenen Text mit Musik zu untermalen (Dia-Vertonung, Schallplatten-Jockeis in Tanzlokalen) oder um von einem Programm sanft in das nächste zu überblenden. Hierzu braucht man sogenannte Mischpulte.

Wie die Mischung von zwei Tonspannungsquellen (es können beliebig viele sein) vor sich geht, zeigt im Prinzip **Bild 46**. Wenn man die beiden Quellen Q 1 und Q 2 gemeinsam an das Gitter einer Röhre oder die Basis eines Transistors anschaltet, verstärken sie beide Darbietungen gleichzeitig. Was am Ausgang A herauskommt, ist ein Tongemisch, das unter Umständen verdächtig nach „Jahrmarktlärm" klingt. Damit man die Tonstärken genau gegeneinander abwiegen, also wirklich vernünftig mischen

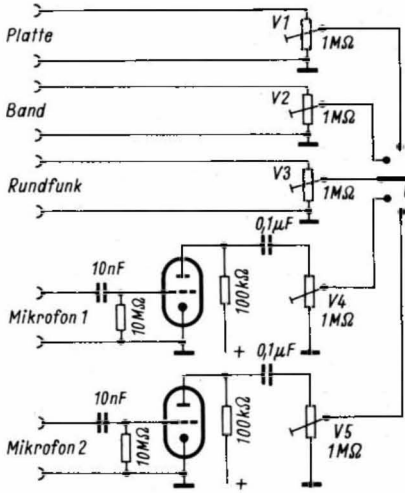


Bild 45. Eingangsumschaltung mit Vorverstärkern und Pegeleinstellern

Unten: Bild 47. Eine Schaltung mit zwei Mischpotentiometern, die nicht funktionieren kann

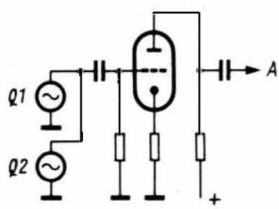
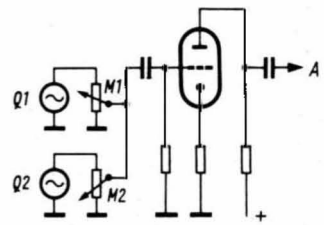
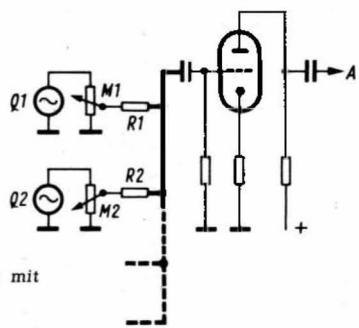


Bild 46. Prinzip einer Mischschaltung





Rechts: Bild 48. Mischschaltung mit Entkopplungswiderständen

kann, braucht jede Quelle einen eigenen Lautstärkeeinsteller. Leider ist das nicht ganz so einfach, wie es sich anhört. Die Schaltung **Bild 47** kann nämlich gar nicht funktionieren, obwohl man das auf den ersten Blick nicht sofort einsieht. Denkt man sich aber den Schleifer des oberen Mischpotentiometers am oberen (= laut), den von M 2 am unteren Anschlag (= Null), dann schließt das zweite Potentiometer die Tonspannung von Quelle 1 kurz. Es ist überhaupt nichts zu hören.

Dieses Übel verhindern die Entkopplungswiderstände R 1 und R 2 in **Bild 48**. Auch wenn das Potentiometer M 1 auf Voll, M 2 dagegen auf Null steht, kann die Tonspannung an der stark gezeichneten Sammelschiene (= Knotenpunkt) nicht zusammenbrechen. Im gezeichneten Beispiel verhindert der Widerstand R 2 den unerwünschten Kurzschluß. Die sogenannte Knotenpunkt-Dämpfung beträgt 6 dB (= 50 %), und zwar auch das nur im Extremfall (M 2 in Nullstellung). Weil das Ohr Tonspannungsunterschiede im Verhältnis 1 : 2 kaum hört, wirkt sich das Herunterregeln des Mischpotentiometers M 2 auf die Lautstärke der Quelle Q 1 praktisch überhaupt nicht aus.

Dieses gegenseitige Nichtbeeinflussen bleibt auch erhalten, wenn noch weitere Quellen über Vorwiderstände (gestrichelt gezeichnet) an der Sammelschiene liegen, vorausgesetzt, alle Längswiderstände R und alle logarithmischen Potentiometer M sind gleich groß.

Mit der Anzahl der Mischpotentiometer wächst aber auch die Knotenpunkt-Dämpfung an der Sammelschiene. Wenn bei zwei Mischpotentiometern die Tonspannung einer Quelle auf die Hälfte zurückgeht, liefert sie bei drei Potentiometern nur noch ein Drittel und bei fünf nur noch ein Fünftel. Diesen Spannungsverlust muß eine nachgeschaltete Röhre im Summenkanal (Summenverstärker) wieder ausgleichen.

In Bild 34 lernten wir bereits einen Summenverstärker kennen, der noch zusätzlich mit einem Hoch-Tief-Entzerrer versehen ist. Wenn schon diese Zusammenfassung für Großanlagen nach dem Bausteinprinzip sinnvoll ist, dann liegt es erst recht nahe, bei Geräten für den privaten Bedarf auch noch die Eingangsumschaltung oder den Mischteil sowie die Mikrofonverstärkung zu einem einzigen Steuergerät bzw. zu einem Mischpult zusammenzufas-

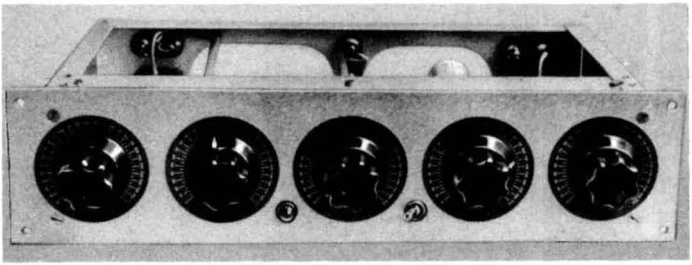


Bild 49. Frontansicht des Steuergerätes STG 100

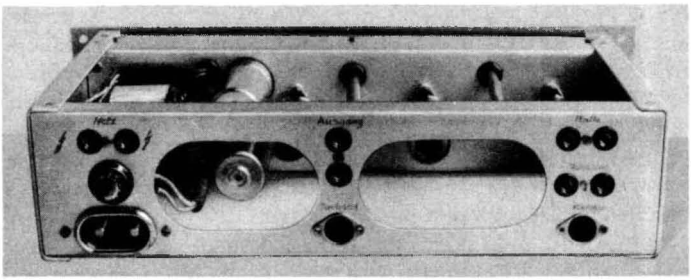


Bild 50. Rückansicht des STG 100

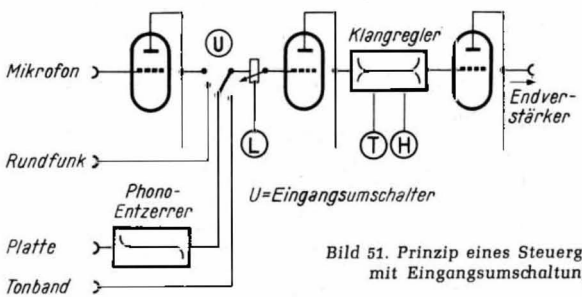


Bild 51. Prinzip eines Steuergerätes mit Eingangsumschaltung

sen. An diese „Regiebaugruppe" kann man bei Bedarf mehrere Endverstärker anschalten.

Die **Bilder 49** und **50** zeigen das vom Verfasser entwickelte Misch- und Steuergerät STG 100, das den meisten Anforderun-

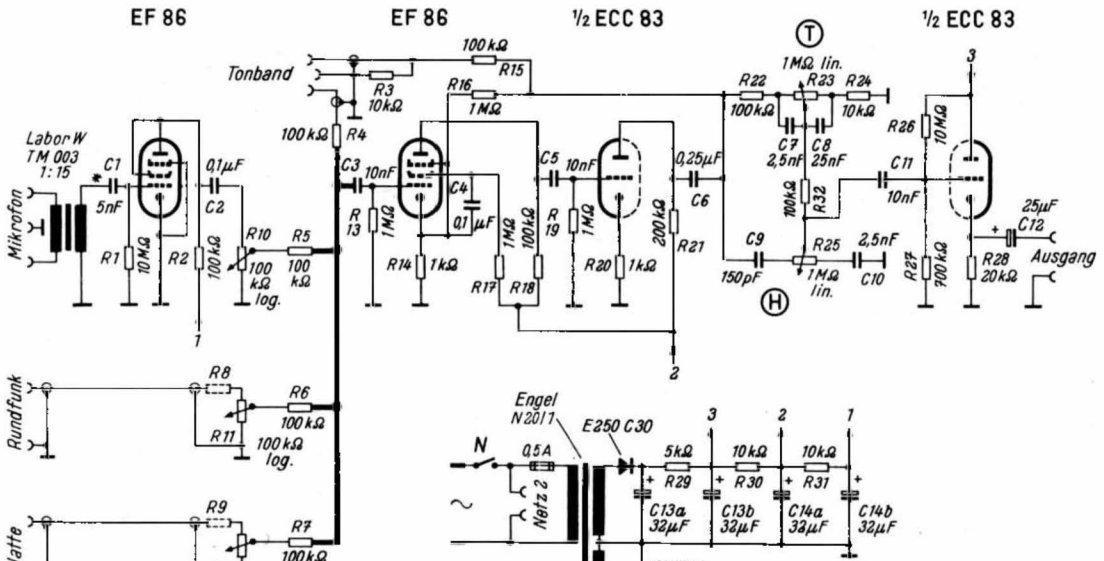


Bild 52. Schaltung des Steuergerätes STG 100

gen des Praktikers und des Heimtonfreundes entspricht und das keinen nennenswerten Mehraufwand gegenüber einem reinen Steuergerät (ohne Mischpotentiometer) erfordert. Die etwas umfangreiche Schaltungsbesprechung soll die bereits angeschnittenen Probleme noch besser erläutern und für eigene Entwürfe die Kenntnis der Zusammenhänge vertiefen.

In der Regel kommt man mit den vier Spannungsquellen Mikrofon, Rundfunk, Platte und Tonband tadellos aus. Diese liefern ungefähr die in **Tabelle 1** angegebenen Tonspannungen.

Tabelle 1. Tonspannungen von Nf-Quellen

Mikrofon	ca. 1 mV
Plattenspieler	ca. 500 mV
Rundfunk-Diodenausgang	ca. 500 mV
Tonbandgerät	ca. 100 mV

Damit man vernünftig umschalten oder mischen kann, sind am Umschalter U (vgl. Bild 44 und 45) bzw. an der Sammelschiene (vgl. Bild 48) ungefähr gleich hohe Tonspannungen nötig. Demnach braucht man im Mikrofonkanal eine Vorröhre, die (bei einem Tauchspulenmikrofon) zusammen mit dem Eingangsübertrager eine rund 150fache Spannungserhöhung sichert. Der Schallplattenkanal fordert bei Verwendung eines Kristallsystems keinerlei Zusätze. Arbeitet man dagegen mit einem Magnetsystem, dann kommt ein Entzerrer-Vorverstärker hinzu, etwa ähnlich Bild 25. Praktisch kann man aber meist darauf im Mischpult verzichten, weil diese Vorentzerrer heute nahezu immer im Plattenspieler selbst enthalten sind.

Als denkbar einfachste Schaltung für ein reines Steuergerät (ohne Mischpotentiometer) würde sich demnach eine Schaltung nach **Bild 51** ergeben. Ein solches Gerät würde drei Röhren und vier Bedienungsgriffe (Umschalter, Lautstärke, Höhen, Tiefen) enthalten. Nimmt man nur ein einziges Bedienungselement hinzu und benutzt als dritte Röhre eine Doppeltriode, so läßt sich das recht elegant konstruierte Mischgerät nach **Bild 52** verwirklichen.

Die Mikrofon-Vorröhre arbeitet als Triode mit rund 10facher Verstärkung. Der Eingangsübertrager 1 : 15 sorgt dafür, daß die

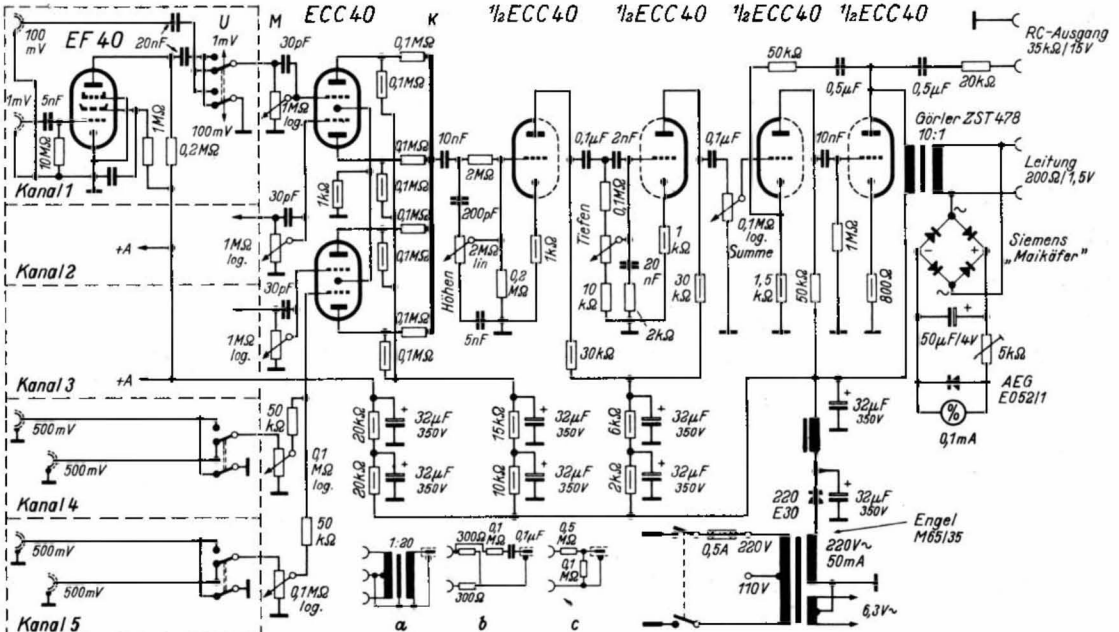


Bild 53. Schaltung eines sehr vielseitigen Mischverstärkers

Eingangsspannung von 1 mV (vgl. Tabelle 1) am oberen Ende des Mischpotentiometers R 10 rund 150 mV ausmacht. Wer ein Kristallmikrofon anschließen will, läßt den Eingangsübertrager weg, legt das Mikrofon an den mit einem Stern bezeichneten Punkt und betreibt die Vorröhre als Pentode. Der einzufügende Schirmgitterwiderstand von 390 kΩ ist dann mit 0,5 µF nach Masse zu überbrücken.

Damit an der stark gezeichneten Sammelschiene (= Knotenpunkt) ungefähr gleiche Tonspannungen von sämtlichen Quellen anliegen, müssen auch vor den Längswiderständen R 4 bis R 7 rund 150 mV gemessen werden. Diese Werte sind laut Tabelle 1 ohnehin gewährleistet und etwa vorhandene Überspannungen bei Platte und Rundfunk gleichen die Vorwiderstände R 8 und R 9 aus, die bei Bedarf durch Versuch zu ermitteln sind. Sie ersetzen die Voreinsteller von Bild 45.

Obwohl das Gerät nur drei Mischpotentiometer besitzt, läßt sich auch die vierte Quelle einmischen. Man braucht dazu nur das sowieso vorhandene Wiedergabe-Potentiometer im Bandgerät zu bedienen. Seine Ausgangsspannung gelangt über den Längswiderstand R 4 auf die Sammelschiene. Berücksichtigt man die Knotenpunkt-Dämpfung und rechnet auch sonst recht vorsichtig, so liegen an der Sammelschiene rund 25 mV Tonspannung. In der anschließenden Pentode EF 86 und im ersten Triodensystem, die über den Widerstand R 16 kräftig gegengekoppelt sind, erfolgt eine rund 500fache Summenverstärkung, so daß am Kondensator C 6 etwa 12,5 V Tonspannung anstehen. Das anschließende Hoch-Tief-Netzwerk setzt diese Tonspannung auf rund 1 V herab, und dieser Wert steht auch hinter der Impedanzwandlerstufe an C 12 niederohmig (rund 300 Ω) zur Verfügung.

Über den Spannungsteiler R 15/R 3 gelangt von der Klangeinstellung unbeeinflußte Tonspannung aus dem Summenkanal zur Tonband-Anschlußbuchse, so daß man gleichzeitig während einer Übertragung auch Band-Mitschnitte vornehmen kann.

Gleich mehrere „Nummern größer" ist ein weiteres vom Verfasser gebautes Mischpult, dessen Schaltung **Bild 53** wiedergibt. Das Gerät bewährt sich schon seit vielen Jahren im Amateurstudio und bei Übertragungen mit fliegend aufgebauten Anlagen.

Es ist so vielseitig, daß es fast einem kommerziellen Regiesatz in einem Übertragungswagen ähnelt.

Zum Mischen stehen fünf Potentiometer M zur Verfügung, vor denen fünf Eingangsumschalter U angeordnet sind, die auf insgesamt zehn feste Eingänge umschalten. In den drei oberen Kanälen 1 bis 3 befindet sich jeweils in einer Umschalter-Stellung noch je eine Vorröhre, die bei Bedarf als Mikrofon-Vorverstärker arbeitet. Dadurch erhält, abhängig von der Schalterstellung, einer der beiden umschaltbaren Kanal-Eingänge eine Empfindlichkeit von 1 mV, der andere von 100 mV. In den Kanälen 4 und 5 sind die zugehörigen Mischpotentiometer über 50-kΩ-Widerstände zusammengeführt, wodurch sich eine Eingangsempfindlichkeit von je 500 mV für die verbleibenden vier Eingänge ergibt.

Beim aufmerksamen Betrachten der oberen drei 1-MΩ-Mischpotentiometer fallen die 30-pF-Kondensatoren zwischen „heißem" Anschluß und Schleifer auf. Mit diesem Schaltungskniff kompensiert man den unvermeidlichen kapazitiven Nebenschluß, den die abgehenden abgeschirmten Leitungen bilden. Da diese in Mittelstellung der Potentiometer sehr hochohmig sind (max. 0,3 MΩ), kann die Erdkapazität der abgehenden Leitungen einen Teil der höchsten Töne schwächen. Das verhindern die Korrekturkondensatoren, deren Wirkung in den Endstellungen der Potentiometer immer geringer wird, denn dort braucht man keine Korrektur mehr.

Das Besondere bei diesem Mischgerät ist, daß die eigentliche Mischschiene (vgl. Bild 48) nicht unmittelbar hinter dem Einstellern folgt, sondern von denen noch durch je ein Triodensystem getrennt ist. Sie befindet sich (in Bild 53 stark gezeichnet) erst hinter den Trennstufen. Dadurch steht am Knotenpunkt K und nach Teilung durch die vier Vorwiderstände die verhältnismäßig hohe Tonspannung von rund 500 mV zur Verfügung, wodurch sich ein sehr günstiges Nutz-/Störspannungsverhältnis einstellt. Am Knotenpunkt kann man bei Bedarf über einen weiteren Vorwiderstand (Richtwert 50 kΩ) die Aufsprechspannung für ein Tonbandgerät abzweigen (vgl. Tonbandanschluß oben in Bild 52), wobei man allerdings die Wiedergabeleitung (vom Bandgerät kommend, also die untere Buchse des dreipoligen Steck-

Bild 54. Mischpultverstärker nach Bild 53 zusammen mit einem Rundfunk- und Abhörzusatz im Transportkasten

anschlusses in Bild 52) an einen 100-mV-Eingang der Kanäle 1 bis 3 anschließt. Bei dem vorliegenden Mischgerät verfügen wir ja über genügend Mischpotentiometer.

An die Mischschiene schließen sich zwei Triodenstufen an, die in der Hauptsache die Eigendämpfung der zugehörigen Hoch-Tief-Entzerrer wieder ausgleichen. Beide Stufen schließt der Summeneinsteller ab, mit dem man die Ausgangslautstärke des gesamten Gerätes bestimmt. Die nächsten beiden Stufen sind über das Glied 0,5 µF/50 kΩ kräftig gegengekoppelt, um den Ausgangsteil zu stabilisieren und den etwa frequenzbeschneidenden Einfluß des Ausgangsübertragers auszugleichen. Der Ausgang ist nämlich — wie es im kommerziellen Betrieb üblich ist — erdsymmetrisch und niederohmig ausgeführt. Für Versuche (etwa Anschluß einer Endröhre EL 84 mit Mithörlautsprecher) wurde noch ein hochohmiger Kontrollausgang vorgesehen.

Parallel zum Leitungsausgang liegt ein einfacher Aussteuerungsmesser. Der Parallel-Gleichrichter am Instrument macht

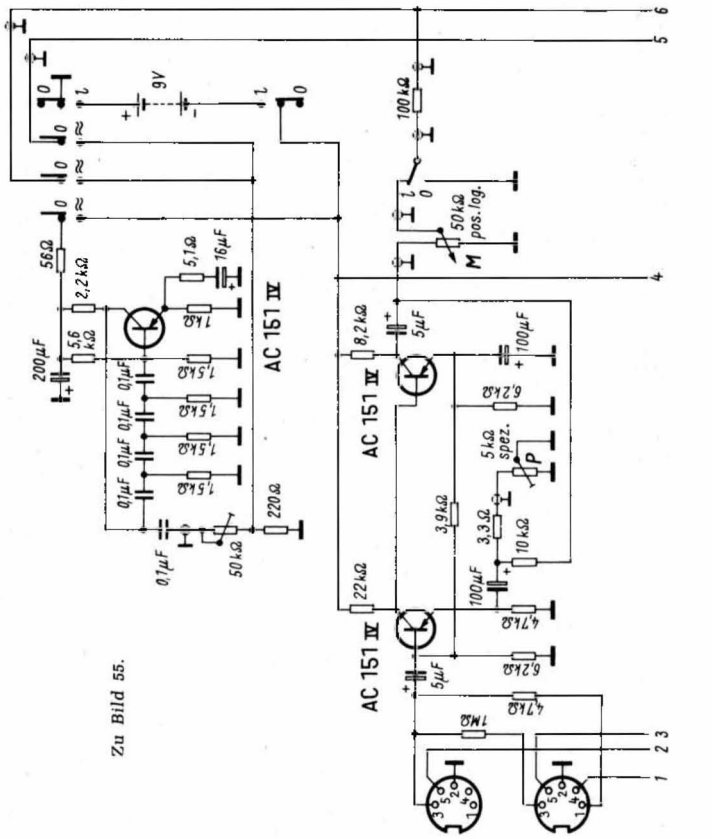
die Anzeige nahezu logarithmisch und der vorgeschaltete Elektrolyt-Kondensator (50 µF/4 V) sorgt für einen einigermaßen langsamen Zeiger-Rückgang.

Unten in Bild 53 erkennt man drei Schaltungsvorschläge für Zwischenstecker, die das Gerät unter Umständen noch universeller machen. Der Stecker a enthält einen Mikrofon-Kleinübertrager. Man steckt ihn dann an einen der 1-mV-Eingänge, wenn mit einem niederohmigen Tauchspulenmikrofon gearbeitet wird. Im Originalzustand können hochohmige Mikrofone oder Kristallmikrofone angeschlossen werden. Mit dem Zwischenstekker b lassen sich symmetrische Mietleitungen (gemietete Postkabel) an einen 100-mV-Eingang anpassen. Der Stecker c leistet manchmal gute Dienste, wenn ein sehr lautstarker Kristalltonabnehmer an einen 100-mV-Eingang anzupassen ist.

In **Bild 54** ist die Transportkiste zu sehen, in die das beschriebene Mischgerät zusammen mit einem Rundfunkempfänger eingebaut wurde. Der Empfänger-Nf-Teil kann mit einem Umschalter wahlweise hinter dem Empfangsteil oder hinter dem Mischpult-Ausgang betrieben werden. Auf diese Weise bilden beide Einheiten eine kleine Regiezentrale, die sich beim Verfasser auch bei zahlreichen Übertragungen mit fliegend aufgebauten Anlagen hervorragend bewährte.

Der aufmerksame Leser hat sicher längst bemerkt, daß das Gerät noch mit Röhren der 40er-Serie bestückt ist. Das beweist aber eigentlich nur, wie viele Jahre die Schaltung unverändert beibehalten werden konnte. Wer unbedingt Röhren der 80er-Serie verwenden möchte, soll es ruhig tun, aber an den guten Eigenschaften der erprobten Anordnung wird dadurch nichts verbessert, weil es kaum etwas zu verbessern gibt.

Mischschaltungen mit Transistoren haben vor allem bei Stereoschaltungen ihre Vorzüge, weil sich die Anzahl der erforderlichen Verstärkerstufen mindestens verdoppelt. Da Batteriespeisung möglich ist, entfallen viele Brumm-Probleme, und außerdem vereinfachen die niederohmigen Verhältnisse die Abschirmmaßnahmen. Trotzdem: Wollte man die Schaltung von Bild 53 mit Transistoren in Stereotechnik nachbauen, es würde daraus ein ganzer Transistor-„Wald"! Das mag wohl auch der Grund dafür sein, daß sogar verhältnismäßig umfangreiche Geräte dieser Art


9V
AC 151 III
AC 151 III
AC 151 III
100kΩ
50kΩ pos. log.
M
56Ω
2,2kΩ
200µF
5,6 kΩ
5,1Ω
16µF
1,5kΩ
0,1µF
220Ω
50 kΩ
8,2kΩ
5µF
100µF
6,2kΩ
5kΩ spez.
P
3,9kΩ
3,3Ω
10kΩ
22kΩ
4,7kΩ
1MΩ
1 2 3
4
5 6
1
2

Zu Bild 55.

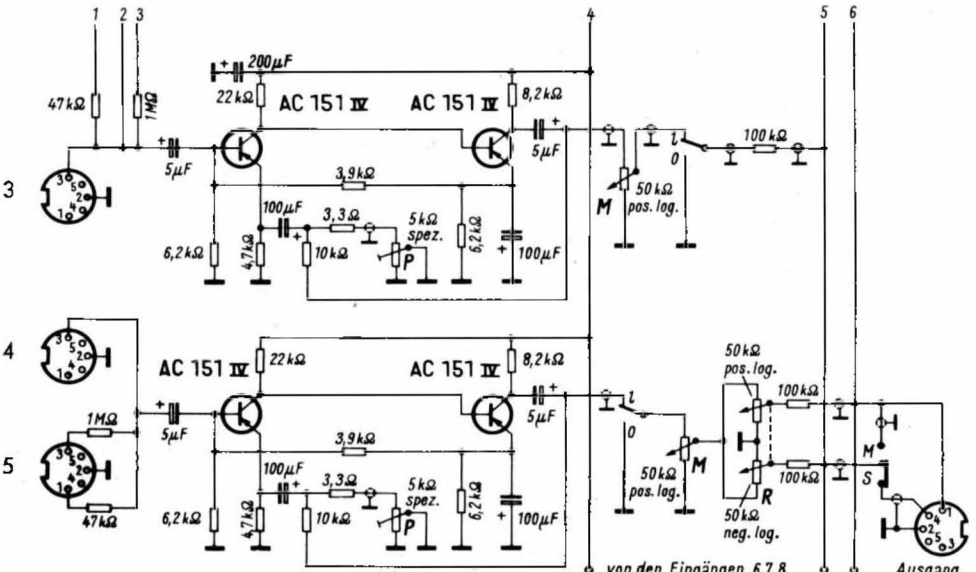


Bild 55. Schaltung des Uher-Mischgerätes Stereo-Mix 5

aus der Industriefertigung vergleichsweise wenig Mischmöglichkeiten bieten.

Eine recht elegante Lösung ist die Schaltung des Uher-Mischgerätes Stereo-Mix (**Bild 55**). Es enthält fünf Verstärkerkanäle, von denen zwei aus Gründen der besseren Übersicht nicht eingezeichnet sind. Die fehlenden Eingänge 6, 7 und 8 entsprechen genau den gezeichneten 1 bis 3.

Die Stereobuchsen 1 und 6 sind für den Anschluß von Stereomikrofonen, die weniger empfindlichen 2 und 7 für Überspielanschlüsse von Bandgeräten bestimmt. An Buchse 3 kann man eine Monoquelle anstecken, ebenso an Buchse 8. Bei den Buchsen 4 und 5 schließt sich ein Monokanal an, hinter dessen Mischpotentiometer noch zusätzlich ein Richtungsmischer R vorgesehen ist. Mit seiner Hilfe kann man den Schalleindruck der Zumischung (z. B. Marschmusik) von links nach rechts oder umgekehrt über die gedachte Szene wandern lassen und interessante Effekte erzielen. Ganz oben im Schaltbild ist ein einstufiger RC-Generator für 1000 Hz eingezeichnet, der das Einpegeln der Anlage erleichtert. Für Feinschmecker sei noch darauf hingewiesen, daß die Pegel-Voreinsteller P im Gegenkopplungsweg liegen. Das sichert ein besonders günstiges Nutz-/Störspannungsverhältnis, weil man nicht im Verstärkereingang dämpft, sondern die Verstärkungsziffer selbst auf den gerade benötigten Wert einstellt. Für das Mischpult, das zum Vorschalten vor Magnettongeräte bestimmt ist und das deshalb keinen Aussteuerungsmesser und auch keine Klangkorrektur enthält, nennt der Hersteller die in **Tabelle 2** angeführten technischen Daten.

Tabelle 2. Technische Daten des Mischpultes Bild 55

Frequenzbereich	20...20 000 Hz
Dynamik	> 60 dB
Ausgangswiderstand	Mischpult = 20 kΩ
	Pegelton = 200 Ω
Übersprechdämpfung	> 55 dB
Klirrfaktor	< 0,5 %

3.10 Lautsprecherverstärker

Lautsprecherverstärker sind auf die Besonderheiten eines Verbrauchers, nämlich des Lautsprechers, zugeschnitten. Sie müssen

z. B. die erforderliche Sprechleistung liefern – was zum Teil eine Frage der Raumgröße ist –, und sie sollen auch jene Mängel ausgleichen, die z. B. normalen Allton-Lautsprechersystemen anhaften. Im Prinzip ist jeder Nf-Teil eines handelsüblichen Rundfunkempfängers nach diesen Gesichtspunkten bemessen. Dutzende von Schaltungen sind möglich, sie unterscheiden sich nur durch den technischen Aufwand. Das Beispiel, das wir anführen, ist lediglich eines von vielen. Beschäftigen wir uns zunächst etwas näher mit den erforderlichen Besonderheiten!

Ganz allgemein kann gesagt werden, daß normale Lautsprecher bei den tiefsten und höchsten Tönen eine schlechtere Schallabstrahlung bringen als im mittleren Frequenzbereich. Besonders auffällig ist dieser Mangel bei den Tiefen. Hinzu kommt noch, daß die üblichen Schallwände, Gehäuse und Trichter aus räumlichen Gründen selten so groß gemacht werden können, daß eine verlustarme Abstrahlung der Bässe sichergestellt wird. Eine Ausnahme bilden die modernen geschlossenen Boxen mit eingebauten Spezial-Tieftönern. Ihre Hochtonsysteme sind bereits so angepaßt, daß sie spannungs-proportionalen Schalldruck abgeben, und die Baßlautsprecher arbeiten bis herunter zu 40...70 Hz linear. Nur wer sehr hohe Ansprüche stellt, wird noch bei den äußersten Frequenzgrenzen gewisse elektrische Korrekturen vornehmen. In jedem Fall erscheint es jedoch zweckmäßig, durch veränderbare Höhen- und Tiefenwiedergabe eine gewisse Anpassung an den persönlichen Geschmack und an die akustischen Eigenschaften des Wiedergaberaumes herbeizuführen. Hierzu gesellt sich noch eine andere physikalische Tatsache. Das menschliche Ohr empfindet tiefste und höchste Töne als weniger laut, wenn sie mit geringen Schalldrücken einfallen. Bewußt oder unbewußt hat jeder Verstärker-Praktiker schon mit diesem akustischen Phänomen Bekanntschaft gemacht.

Stellt man einen Lautsprecher auf saalfüllende Lautstärke ein und beobachtet man Orchestermusik, dann ist der Klangeindruck durchaus befriedigend, vorausgesetzt, daß die verwendeten Geräte einwandfrei sind. Wenn man jetzt die Lautstärke immer mehr zurückregelt, dann scheint es dem Ohr, als ob zunächst die Bässe und weniger ausgeprägt auch die Höhen im Vergleich zur Mittellage stärker gedämpft würden. Geht man bis auf Zim-

merlautstärke zurück, dann klingt eine Musikübertragung ausgesprochen dünn und fad. Um trotzdem bei mäßigen Lautstärken einen ästhetischen Klangeindruck zu bekommen, muß der Baßtonbereich angehoben werden, und zwar um so stärker, je geringer die eingestellte Gesamtlautstärke ist. Hierzu dient die *gehörrichtige Lautstärkeeinstellung*, die mit einem im unteren Drittel des Drehbereiches angezapften Lautstärkepotentiometer erzielt wird. An diesem Zapfpunkt liegt ein RC-Glied gegen Masse, das Mittellagen und Höhen bei leiser Einstellung des Reglers mehr dämpft als die Tiefen. Die Bässe erscheinen also angehoben und das natürliche Klangbild bleibt gewahrt. Gebräuchliche Werte dieser Schaltung: Potentiometer = 1,3 MΩ logarithmisch, Nebenwiderstand = 50 kΩ, Kondensator = 10 nF.

Von Haus aus vorhandene Mängel (offene Gehäuse, zu kleine Schallwände) gleichen die Höhen- und Tiefeneinsteller aus, die auch jene Korrekturen im Klang bewirken, die der Raum oder der persönliche Geschmack verlangen. Um das Gesamtbild abzurunden, sei noch folgendes ergänzt: Lautsprecherverstärker (= Abhörverstärker), die mit modernen geschlossenen und nahezu schalldrucklinearen geschlossenen Boxen betrieben werden, sind zwar bezüglich der „Grundentzerrung" (= Korrektur schlechter Höhen- und Tiefenwiedergabe) anspruchsloser. Aber sie können trotzdem nicht auf die Höhen- und Tiefeneinsteller verzichten, sie unterscheiden sich also in der Schaltung nicht von jenen Geräten, die für preiswerte handelsübliche Systeme bestimmt sind. Nur einen markanten Unterschied muß man beachten: Die klanglich ausgezeichneten geschlossenen Boxen brauchen bei gleicher Lautstärke wesentlich mehr Sprechleistung als sehr große oder offene Gehäuselautsprecher bzw. solche Systeme, die auf einer Schallwand sitzen. Vergleichszahlen sind nur sehr schwer zu nennen, weil die Zusammenhänge, die den Wirkungsgrad bestimmen, sehr stark verzahnt sind. Sicher kann aber ein ganz roher „Daumenvergleich" wenigstens ungefähr Klarheit schaffen.

Eine geschlossene Box braucht etwa doppelte Tonspannung gegenüber der konventionellen Lautsprecher-Bauweise. Doppelte Spannung verlangt demnach vierfache Sprechleistung, das entspricht einem 20-Watt-Verstärker gegenüber einer 5-Watt-

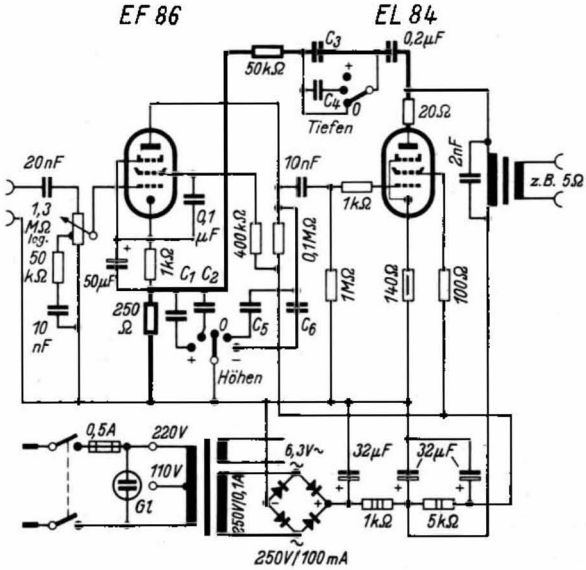


Bild 56. Lautsprecherverstärker mit gehörrichtiger Lautstärkeeinstellung sowie Höhen- und Tiefenbeeinflussung. Richtwerte für die Korrekturglieder: C_1 = 0,3 µF, C_2 = 0,1 µF, C_3 = 10 nF, C_4 = 50 nF, C_5 = 10 nF, C_6 = 50 nF, Gl = Signalglimmlampe

Ausführung. Man kann das aber auch umgekehrt ausdrücken: Ein fast voll ausgesteuerter 5-Watt-Verstärker macht mit einer geschlossenen Box den gleichen „Lärm" wie mit einem konventionellen System, das mit 1,25 Watt betrieben wird. Gehörmäßig beurteilt ist das gar nicht viel, denn Spannungsverhältnisse von 2 : 1 (entsprechend Leistungsverhältnissen 4 : 1) nimmt unser logarithmisch empfindendes Ohr gerade erst wahr.

Bild 56 gibt die Schaltung eines Lautsprecherverstärkers wieder, der in seiner Einfachheit bei bester Qualität kaum zu überbieten ist. Eingangsseitig erkennt man den beschriebenen gehörrichtigen Lautstärkeeinsteller. Von der Anode der Endröhre führt eine Gegenkopplung (stark gezeichnet) in den Katodenkreis der Vorstufe. Wenn Tiefen- und Höhenschalter in Stellung „0" stehen, arbeitet der Verstärker praktisch zwischen 40 und

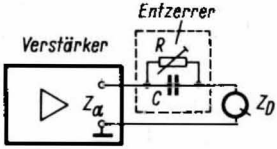
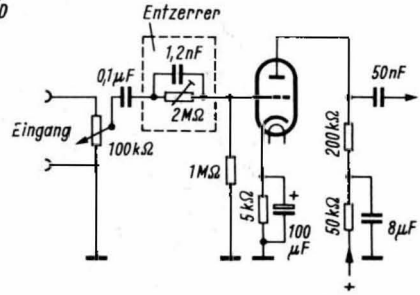


Bild 58. Prinzip der Schneidentzerrung am Verstärkereingang

Links: Bild 57. Prinzip der Schneidentzerrung am Verstärkerausgang



14 000 Hz linear. Durch stufenweises Verkleinern des Kondensators an der Anode der Endröhre werden die Bässe angehoben, durch Einschalten der Parallelkondensatoren C_1 und C_2 die Höhen. In der entgegengesetzten Stellung des Höhenschalters dämpft man die hohen Töne. Die in der Bildunterschrift genannten Richtwerte können je nach Geschmack geändert werden, um die Anhebung dem vorhandenen Lautsprecher anzupassen.

Der beschriebene Verstärker leistet rund 5 Watt; er kann ohne Schaltungsänderung mit allen auf dem Markt befindlichen ähnlichen Röhren des In- und Auslandes aufgebaut werden. Man muß nur dafür sorgen, daß der Katodenwiderstand der Endröhre den richtigen Listenwert erhält und daß bei anderer Bestückung Netztransformator und Trockengleichrichter (in jedem Fall für 1 × 250 V) den Anodenstrombedarf der Endröhre zuzüglich 20 % aufbringen können. Mit der EL 34 erzielt man beispielsweise 10 Watt Sprechleistung, und das mit nur zwei Röhren!

3.11 Schreiberverstärker für die Schallfolien-Aufnahme

Warum bei der Schallfolienaufnahme die Bässe beschnitten und die Höhen gegenüber 1000 Hz angehoben werden müssen, geht aus Abschnitt 3.4 hervor. Kleine Tonstudios und Amateure verwenden zum Aufzeichnen manchmal behelfsmäßig einen einfachen Kraftverstärker, bei dem sie entweder den Tiefeneinsteller auf Minus und den Höheneinsteller auf Plus stellen, und falls

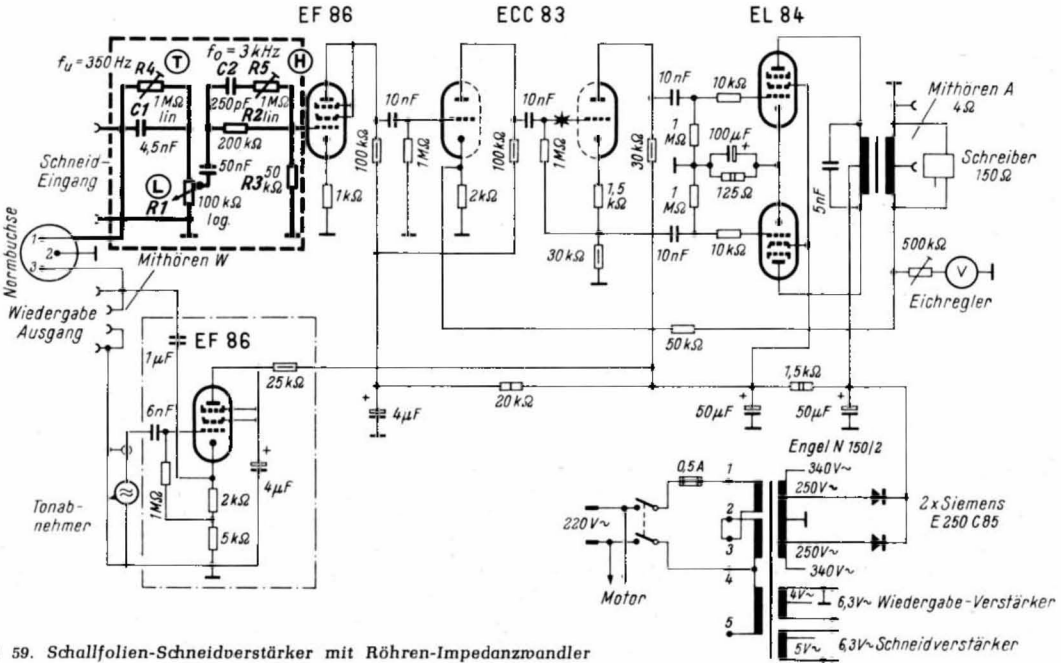


Bild 59. Schallfolien-Schneidverstärker mit Röhren-Impedanzwandler für den Wiedergabekanal

solche Potentiometer fehlen, erzielen sie mit ebenso behelfsmäßig eingeschalteten Entzerrern die gewünschte Schneidkennlinie. Am einfachsten läßt sich der Ausgangsentzerrer nach **Bild 57** einfügen, weil er infolge des hohen Pegels keinerlei Abschirmung erfordert und entweder als Zwischenstecker ausgeführt oder in das Schneidgerät eingebaut werden kann. **Tabelle 3** nennt Richtwerte für die Bauelemente.

Tabelle 3. Richtwerte für Entzerrer nach Bild 57

Verstärkerausgang Z_a	Einstellwiderstand R	Kondensator C	Schneiddose Z_D
150 Ω 5 Ω	2 kΩ 100 Ω	1 µF 25 µF	150 Ω 5 Ω

Günstiger verhält sich ein Eingangsentzerrer nach **Bild 58**, der hinter den Lautstärkeeinsteller in eine Gitterleitung einzufügen ist. Bei beiden Zusätzen läßt sich die Kennlinie mit den Paralleltrimmern zu den Vorkondensatoren ungefähr abgleichen.

Natürlich ist es am besten, wenn man sich einen speziellen Schneidverstärker baut. Hierfür gibt **Bild 59** ein erprobtes Beispiel. Höhenanhebung und Tiefenabsenkung bewirkt der stark gezeichnete Eingangs-Entzerrer. Die Trimmpotentiometer T und H erlauben guten Abgleich auf die gewünschte Kennlinie. Unten links erkennt man für die Schallfolien-Wiedergabe eine Impedanzwandlerstufe, die im Prinzip der nach Bild 24 entspricht.

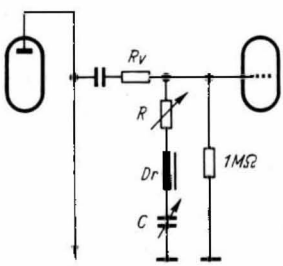


Bild 60. Schreiber-Resonanzentzerrer

Billige gummigedämpfte Schallfolienschreiber, wie sie gewöhnlich von Privatpersonen benutzt werden, haben eine konstruktionsbedingte Resonanzstelle zwischen 1000 und 3000 Hz. Die Frequenzen in diesem Bereich zeichnen sie stärker auf als es der Wirklichkeit entspricht, und das führt zu einer unangenehmen Klangverfälschung. Aber auch hier kann man sich recht elegant helfen, wenn man nach **Bild 60** einen Resonanzentzerrer in den Verstärkungsweg einfügt (Stern in Bild 59). Die Schreiberresonanz, die nach Radio-Praktiker-Bücherei, Band 26, zu bestimmen ist, läßt sich mit dem Kondensator C abstimmen, und die benötigte Abschwächung mit dem Einstellwiderstand R. Richtwerte sind R_V = 500 kΩ, R = 100 kΩ, Dr = 5,5 H, C = 1000 pF. Da man aber in der Regel auf den Drosselwert angewiesen ist, der gerade zu haben ist, berechnet man am besten den L-Wert bei Mittelstellung des Drehkondensators (C = 500 pF) nach der vereinfachten Formel:

$$L = \frac{50{,}7}{f^2} \quad \text{(H, kHz)}$$

3.12 Die Klangeinstellung

Schon mehrfach wurde in den vorangegangenen Abschnitten die Frequenzgangbeeinflussung bzw. die Klangeinstellung gestreift. Man braucht sie, um in der Übertragung enthaltene Fehler auszugleichen (Plattenrumpeln, Windgeräusche am Mikrofon, Platten- oder Empfängerrauschen), um die Wiedergabe an den persönlichen Geschmack anzupassen (= Geschmacksentzerrung), oder auch, um störende Eigenschaften des Wiedergaberaumes (z. B. zu starkes Echo bei den Tiefen) zu mildern. Hierfür gibt es eine Vielzahl bewährter Schaltungen, die meistens aus RC-Netzwerken bestehen.

Die einfachste Schaltung ist die sogenannte „Tonblende" nach **Bild 61**, die irgendwo im Verstärkungsweg liegt. Ein Festkondensator von 1...2 nF dämpft je nach Einstellung des 1-MΩ-Potentiometers die Höhen und täuscht so einen dunkleren Klang vor. Mit einer weiteren einfachen RC-Schaltung, gewissermaßen mit einer umgekehrten Tonblende, lassen sich die Tiefen abschwächen (**Bild 62**). Beide Entzerrer sind in ihrem R/C-Ver-

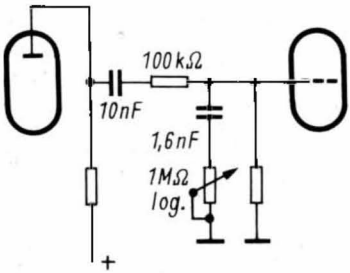


Bild 61. Schaltung für die Höhendämpfung

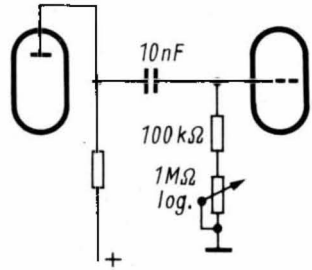


Bild 62. Schaltung für die Tiefendämpfung

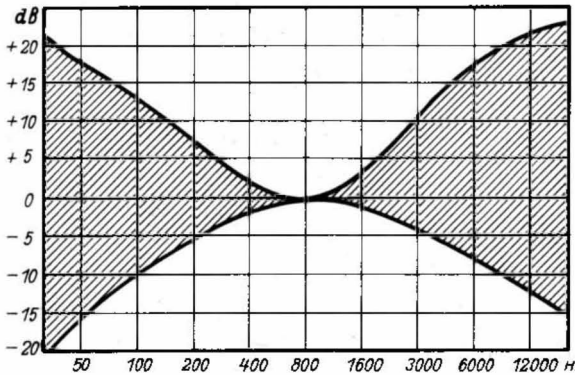


Bild 63. Frequenzkurvenschar eines „Kuhschwanz-Entzerrers" nach Bild 64

hältnis so bemessen, daß sie ober- oder unterhalb von 1000 Hz wirksam werden. Die Netzwerke sind für das Einfügen zwischen Röhrenstufen bestimmt. Zwischen Transistorstufen muß das R/C-Verhältnis bestehen bleiben, aber es ist niederohmiger auszulegen. Richtwerte sind Widerstände mit 1/20 der Ohmzahl und Kondensatoren, die 20mal so viel Kapazität haben.

Daneben gibt es umfangreiche Netzwerke, mit denen man wahlweise Höhen und Tiefen anheben oder absenken kann. Die Frequenzkennlinien weisen je nach Einstellung der Potentiometer an ihren Enden einen sanften Schwung nach oben oder unten auf, weshalb Techniker mit Sinn für Humor einen bild-

haften Vergleich zogen und sie „Kuhschwanz-Entzerrer" tauften. Ein Blick auf die Kennlinien-Schar (**Bild 63**, schraffierte Fläche) entschuldigt diese etwas derbe Bezeichnung.

Eine Anordnung, die im Prinzip so arbeitet, lernten wir bereits im Mischpultverstärker nach Bild 52 kennen. Auch die Klangeinsteller in der Schaltung Bild 53 wirken so, nur mit dem Unterschied, daß hier Höhen- und Tiefennetzwerk durch eine Röhre getrennt sind. Aber in der Praxis gibt es viele solche Variationen. Einmal ändern sich die R/C-Werte bei Transistorschaltungen im bereits erwähnten Verhältnis 20 : 1, aber auch das Verhältnis von R- zu C-Wert hängt davon ab, wohin man den „Drehpunkt" der Frequenzkurve legt. Im Gegensatz zu Bild 63 läßt man gern angesichts besserer Lautsprecher den Tiefen-Wirkungsbereich erst bei 500 Hz und den für die Höhen erst bei 2000 Hz beginnen, so daß sich die Klangbeeinflussung nur bei den ganz tiefen Bässen und den höchsten Höhen deutlich bemerkbar macht.

Das Prinzip einer solchen Kuhschwanz-Schaltung sei an Hand von **Bild 64** näher erklärt. Das von der linken Röhre gelieferte Klangbild gelangt zu den beiden parallel geschalteten RC-Gliedern R 1/C 3/C 2/T/R 2 und C 4/H/C 5. In Mittelstellung beider Einsteller erfolgt durch die Reihenschaltung von R 1/C 3 mit C 2/R 2 eine frequenzunabhängige Spannungsteilung im Verhältnis 10 : 1. Über den Widerstand R 3 gelangen also rund 10 % der Ausgangsspannung der linken Röhre zur folgenden.

Dreht man den Schleifer des Tiefeneinstellers T in Richtung R 1, dann verschiebt sich für die Tiefen das Teilverhältnis. Am Kondensator C 2 fallen plötzlich mehr tiefe Töne ab, weil C 3 kurzgeschlossen ist. Demzufolge entsteht eine starke Baßanhe-

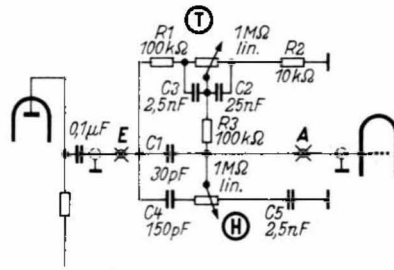


Bild 64. Typisches Klangeinstell-Netzwerk für Höhen und Tiefen

bung. In der entgegengesetzten Einstellung wird der Kondensator C 2 kurzgeschlossen, so daß R 2 den Kondensator C 3 belastet, was einer Tiefenschwächung gleichkommt. In den Zwischenstellungen des Potentiometers erhält man alle erdenklichen Kurvenformen gleicher Tendenz innerhalb des in Bild 63 schraffierten Bereiches.

Mit dem Höheneinsteller H lassen sich in ähnlicher Art die hohen Töne beeinflussen. In Linksstellung von H setzt man dem Klangbild am Punkt A Höhen über den Kondensator C 4 zu, in Rechtsstellung arbeitet C 5 als Tonblende. Durch den Widerstand R 3 wird das zuvor beschriebene Tiefennetzwerk hochohmig gemacht und gleichzeitig vom Höhenkanal entkoppelt. Würde der Widerstand R 3 fehlen, so erfolgte beim Betätigen von T eine „Mitnahme" der Höheneinstellung. Mit anderen Worten: Die Einstellung beider Tonbereiche könnte nicht mehr unabhängig voneinander erfolgen.

Beim oberflächlichen und gehörmäßigen Beurteilen von Schaltungen zur Klangbeeinflussung kommt man häufig zu dem vorschnellen Schluß, daß im Grunde alles Herumdrehen an den Potentiometern zum Schluß doch nur eine mehr helle oder mehr dunkle Wiedergabe hervorruft. Man fragt sich demnach, warum man recht umfangreiche Hoch-Tief-Netzwerke braucht, wenn doch eine gewöhnliche Tonblende den gleichen oder wenigstens einen ähnlichen Eindruck hervorruft. Um die Zusammenhänge zu erklären, muß man etwas weiter ausholen.

Untersuchungen haben ergeben, daß eine Übertragung von Musik dann als befriedigend empfunden wird, wenn das Produkt aus der niedrigsten und höchsten ungeschwächt wiedergegebenen Frequenz gleich 400 000 (Die „Goldene Zahl") ist. Hierzu einige Rechenbeispiele:

Man will ein möglichst breites Band übertragen und verfügt über einen sehr guten Lautsprecher, der bis 40 Hz einwandfrei abstrahlt. Um auf 400 000 zu kommen, muß dafür gesorgt werden, daß der Verstärker bis 10 000 Hz möglichst geradlinig verstärkt. Natürlich muß auch ein Lautsprecher vorhanden sein, z. B. eine Ausführung mit zusätzlichem Hochtonsystem, das 10 000 Hz noch ungeschwächt abstrahlt.

Ein anderes Beispiel:

In einen einfachen Geradeaus-Empfänger für die Aufnahme des Ortssenders, der wegen seiner geringen Trennschärfe eine große hochfrequente Bandbreite besitzt, ist ein dynamischer Lautsprecher eingebaut, der von 100 Hz bis 8000 Hz linear abstrahlt. Der Nf-Teil des Empfängers ist in diesem Bereich auch linear und die Anpassung ist richtig getroffen, so daß praktisch zwischen 100 und 8000 Hz alles „da" ist. Die Wiedergabe klingt aber spitz. Teilt man unsere „Goldene Zahl" 400 000 durch 100, so erkennt man, daß die oberste Frequenzgrenze 4000 Hz sein muß, um eine ästhetische Wiedergabe zu bekommen. Durch eine einfache Tonblendenschaltung wird dies fast erreicht.

Und noch ein Beispiel:

Ein Zwergsuper ist mit einem Kleinlautsprecher bestückt, der nur bis 200 Hz herunter abstrahlt. Um trotzdem eine das Ohr befriedigende Wiedergabe zu bekommen, muß man oben bei $\frac{400\,000}{200} = 2000$ Hz abschneiden. Tatsächlich tut man das auch in manchen billigen ausländischen Exportgeräten. Natürlich hört man dann auch zum Beispiel das hohe Überlagerungspfeifen zwischen zwei eng benachbarten Sendern nicht mehr, das vielleicht ein hochwertiger Heimsuper noch deutlich wiedergibt. Das ist übrigens ein Grund dafür, warum solche einfachen Geräte vom Laien oft als vorbildlich trennscharf angesprochen werden.

Im Zeitalter der UKW-Qualität wird man natürlich nur ungern zur Herstellung des klanglichen Gleichgewichtes von den mit viel Mühe übertragenen höchsten oder tiefsten Tönen etwas abschneiden. Man zieht den umgekehrten Weg vor und hebt lieber die Tonbereiche an, die der Lautsprecher ungenügend abstrahlt oder die infolge ungünstiger akustischer Verhältnisse im Wiedergaberaum unzulässig gedämpft werden. Bei unserem zweiten Beispiel, dem Geradeaus-Empfänger, müßte man also zwischen 50 und 100 Hz eine kräftige Baßanhebung vornehmen. Man kann sich aber auch anders ausdrücken und sagen: „Der Bereich zwischen 100 und 8000 Hz muß *gleichmäßig* gedämpft werden, damit er genau so laut erscheint wie der zwischen 50 und 100 Hz."

Dieses „*gleichmäßig*" ist aber gerade die Schwierigkeit. In **Bild 65** ist eine Frequenzkurve gestrichelt gezeichnet, wie man sie durch

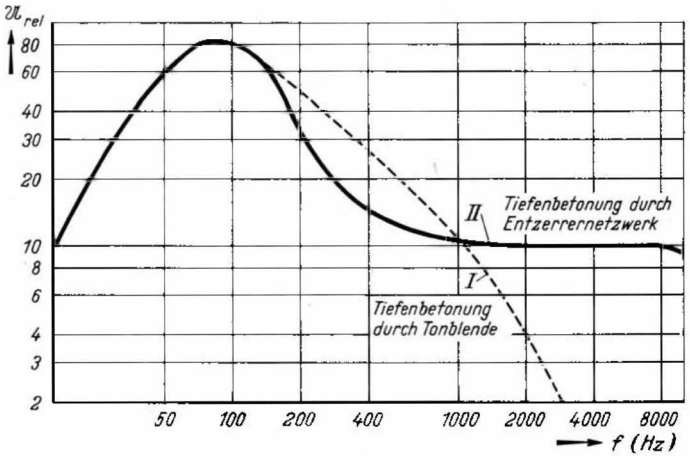


Bild 65. Zwei Frequenzkurven eines Verstärkers. I = Tonblende, II = Tiefenentzerrer

Bedienen der Tonblende in einem Verstärker gewinnt. Der Ton 100 Hz sollte gegenüber 800 Hz 8fach angehoben werden. Das wurde auch erzielt, aber bei 8000 Hz ist praktisch alles abgeschnitten. Die zweite (ausgezogene) Kurve bewirkt den gleichen Effekt, aber über ein kompliziertes Entzerrernetzwerk. Auch hier ist die Frequenz 100 Hz auf das 8fache gegenüber 800 Hz angehoben, aber 8000 Hz sind unbeschnitten. Der Verlauf der Kurve ist viel steiler. Für diesen steilen Verlauf muß man einen größeren technischen Aufwand in Kauf nehmen. Das lohnt sich aber auch in der Praxis, weil man mit modernen Entzerrern etwaige Mängel viel individueller ausgleichen kann. Bei genauem Hinhören klingt dann auch eine entsprechend beeinflußte Übertragung nicht mehr einfach hell oder dunkel, sondern bei einiger Übung merkt man recht bald, daß man sie zweckentsprechend klanglich „retuschierte" und das Bestmögliche aus ihr gemacht hat.

Wer präzise und einigermaßen hochgeschraubte Anforderungen stellt, muß die R/C-Netzwerke in Klangbeeinflussungs-Schaltungen genau berechnen. Man könnte ja gern die Schalldruckkurven der angeschlossenen Einzel-Lautsprecher mit be-

rücksichtigen oder bei Mehrweg-Kombinationen vielleicht auch die Punkte, an denen sich die Lautsprecher-Weichen in der Frequenzkurve überlappen. Das alles erfordert ziemliche Fachkenntnis, und wenn man es genau nimmt, sind auch Meßeinrichtungen erforderlich, über die der Praktiker selten verfügt. Hier fanden nach Kenntnis des Verfassers zuerst die Praktiker aus den USA einen eleganten Ausweg in Gestalt der Mehrkanalverstärker. Zwar erfordern diese gewöhnlich etwas mehr Bauteile, aber dafür funktionieren sie in bezug auf die Klangbeeinflussung „todsicher". Natürlich kann man alle technischen Lösungen kritisieren und Gründe dafür und dagegen nennen, jedoch ist das Prinzip der Mehrkanalverstärker so interessant, daß wir es näher untersuchen wollen.

Bei diesen Verstärkern teilt man das zu übertragende Frequenzband (z. B. 40...20 000 Hz) mit einfachen RC-Filtern in zwei oder drei Bänder auf, die mit getrennten Potentiometern eingestellt und entweder ebenfalls getrennten Endstufen oder einer gemeinsamen zugeführt werden. Weil man bei jedem Kanalpotentiometer über die Extrem-Einstellungen „voll" und „Null" sowie über alle Zwischenwerte verfügt, ergeben sich sehr drastische Möglichkeiten der Klangbeeinflussung. Streng genommen kann man sie nur anwenden, wenn man die Schalldruckkurven der Lautsprecher in Verbindung mit den zugehörigen Kanälen genau ermitteln kann. Natürlich ist auch hierbei die Industrie dem Einzelnen haushoch überlegen, aber hier hat trotzdem der Praktiker eine reelle Chance, denn mit der nötigen Geduld kann er die erforderlichen RC-Werte durch Hörvergleich auf ihre günstigsten Größen bringen.

Bei einem Dreikanalverstärker teilt man die Bänder zum Beispiel etwa so ein:

Bässe:	40.....200 Hz
Mitteltonlage:	150.....4 000 Hz
Hochtonlage:	3500...20 000 Hz

Das ist natürlich nur ein ganz roher Anhalt, und es liegt beim Konstrukteur, eine mehr oder minder saubere Trennung und Überlappung zu erzielen.

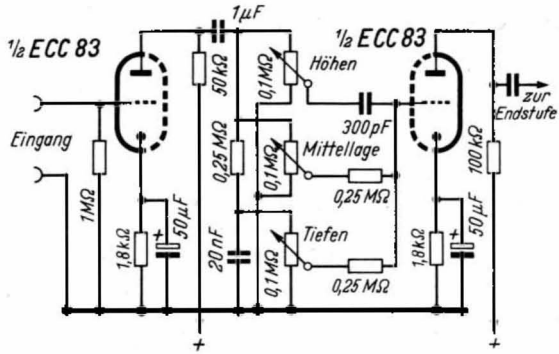


Bild 66. Einfache Dreikanalschaltung

In **Bild 66** ist eine einfache Schaltung zur Kanalaufteilung gezeigt, die einem ausländischen Verstärker entstammt. Die Schaltung ist verblüffend einfach und der genannte Verstärker arbeitet sehr ordentlich. Die von der Anode der Vorröhre kommende Tonfrequenz wird über einen sehr großen Ankopplungsblock drei Potentiometern zugeführt. Am oberen greift man nur die Höhen ab. Am Schleifer liegt nämlich ein sehr kleiner Kondensator, so daß infolge der Belastung mit den beiden darunter gezeichneten Längswiderständen von 0,25 MΩ nur höchste Töne an das Gitter der nächsten Röhre gelangen. Am mittleren Einsteller tritt praktisch das gesamte übertragene Frequenzband in Erscheinung. Am unteren Einsteller aber treten nur Bässe auf, weil dieser mit einem großen Kondensator von 20 nF überbrückt ist. Die Schleifer aller drei Potentiometer sind über die schon erwähnten Längswiderstände, die der Entkopplung dienen, und den kleinen Ankopplungskondensator wieder zusammengeschaltet und gehen auf das Gitter der nächsten Röhre, an dem sich die aufgeteilten Tonbereiche wieder in einem Gesamtkanal vereinigen. Je nachdem, welchen Kanal man schwächt oder dämpft, senkt oder hebt man die Frequenzkurve in dem betreffenden Tonbereich.

Man kann aber das Mehrkanalsystem noch konsequenter durchführen, wenn man sich zu einem allerdings weit größeren Aufwand entschließt. Der Erfolg ist dann aber auch ungleich größer.

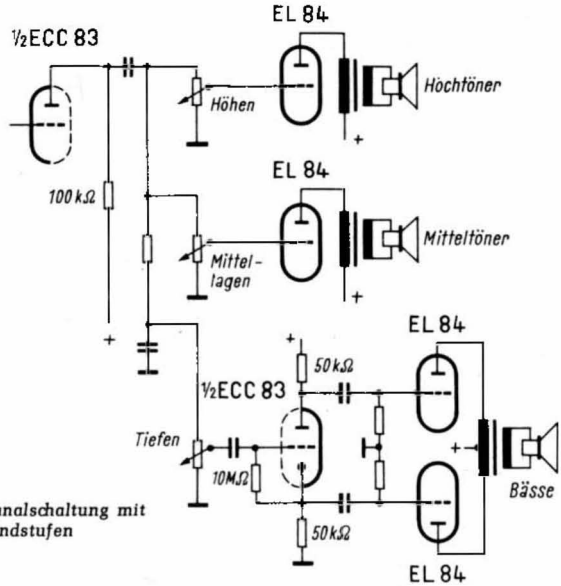


Bild 67. Dreikanalschaltung mit drei Endstufen

Bei der eben besprochenen Schaltung findet am Gitter der zweiten Stufe eine *elektrische* Kanalwiedervereinigung statt. Dient ein Mehrkanalverstärker *nur* der Lautsprecherwiedergabe, dann ist eine *akustische* Kanalvereinigung zweckmäßiger, weil dann jeder Kanal gleich den für seinen Teil-Tonbereich am besten geeigneten Lautsprecher erhalten kann. Das Prinzip einer solchen Schaltung wird in **Bild 67** angeführt. Weil die Bässe die meiste Sprechleistung erfordern, erhalten sie eine kräftige Gegentakt-Endstufe mit zwei Röhren EL 84 sowie der zugehörigen Phasen-Umkehrröhre in Katodyneschaltung (Anoden- und Katodenwiderstand gleich groß). Mittlere und hohe Töne kommen mit Eintakt-Endstufen (je 1 × EL 84) aus.

4 Erprobte Verstärkerschaltungen

Die in diesem Abschnitt besprochenen Schaltungen eignen sich besonders für den Nachbau. Die Bemessungen wurden teils von der Industrie – besonders von den Halbleiter- und Röhrenherstellern –, teils vom Verfasser erprobt. Hier und da wird der Praktiker Varianten wählen, indem er im Abschnitt 3 beschriebene Verstärker-Bausteine mit den nachstehend beschriebenen Geräten kombiniert. Der Autor konnte zwar nicht alle Spezialwünsche seiner Leser vorausahnen, aber er hofft, doch wenigstens in groben Zügen die richtige Auswahl getroffen zu haben.

4.1 Transistor-B-Verstärker mit 6,5 oder 10 Watt Sprechleistung

Dieser Verstärker (nach Telefunken-Angaben), dessen Schaltung **Bild 68a** wiedergibt, zeigt schon durch seine verhältnismäßig hohe Sprechleistung, daß er vorwiegend für netzbetriebene Heimgeräte, für Lautsprecherwagen in Verbindung mit Trichterlautsprechern oder zur Modulation von Amateur-Mobilsendern bestimmt ist. Seine Betriebsspannung beträgt 15 V, die bei Netzspeisung ein stabilisiertes Stromversorgungsgerät nach **Bild 69** liefert. Im Fahrzeug wird eine 12-V-Batterie vorausgesetzt, die bei laufendem Motor ebenfalls diese Spannung abgibt. Aus **Tabelle 4** gehen die Bemessungswerte für die beiden Endleistungen hervor und **Tabelle 5** nennt die Wickeldaten für die erforderlichen Übertrager und das Netzgerät.

Tabelle 4. Bemessung der Schaltung von Bild 68

Sprech-leistg.	$\tilde{U}_{in}$ (P_{out} = 50 mW)	f_u	f_o	R1	R2	R3	R4	R5	R 6	R7	R8	R9	R10 [1]	R11	R12	R13
W	mV	Hz	kHz	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	Ω	Ω	Ω	Ω	kΩ	kΩ	Ω
6,5	0,18	90	13	15	68	2,2	6,2	1	10	150	560	13	20	1	180	62
10	0,27	60	13	8,2	39	2,2	5,6	1	10	82	560	10	10	1	100	35

[1]) NTC-Widerstand (Siemens): 20 Ω, K 151; 10 Ω, K 151.

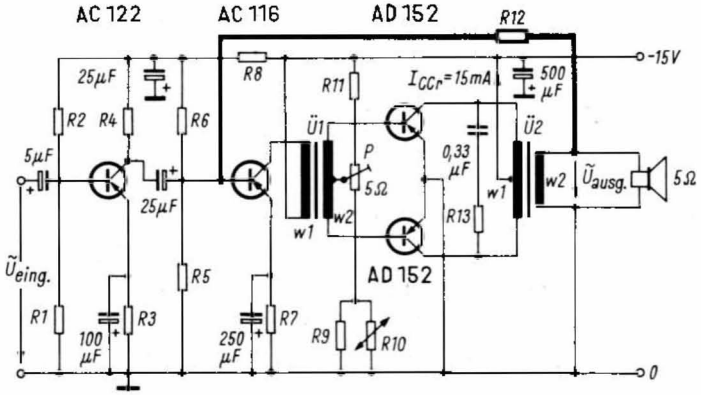


Bild 68a. Schaltung eines Transistor-B-Verstärkers mit Transformatoren

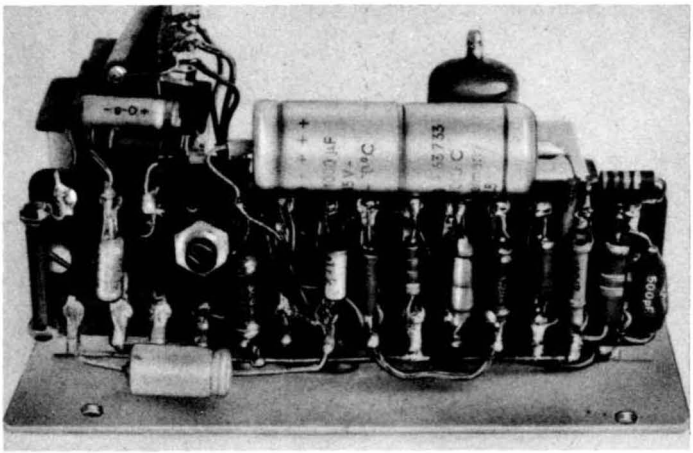


Bild 68b. Versuchsaufbau eines Transistor-Nf-Teils ähnlich Bild 68a für ein Funksprechgerät. Die Endtransistoren sitzen auf dem Grundblech (Kühlung!), die Röhre gehört zum Senderteil

Für andere Ausgangswiderstände (z. B. größer als 5 Ω) sind die Werte der Wicklung w 2 am Ausgangsübertrager entsprechend zu ändern (z. B. Modulator für Amateurfunk-Mobilstation).

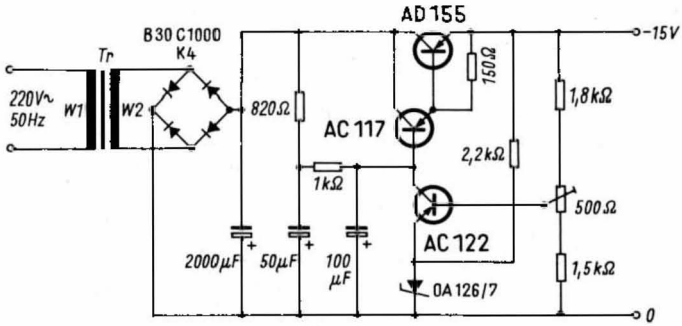


Bild 69. Netzteil für den Verstärker nach Bild 68a

Tabelle 5. Wickeldaten für die Bilder 68a und 69

Treiberübertrager Ü1	6,5 W:	EI 30, Dyn.-Bl. IV, wechselseitig geschichtet w_1 = 1620 Wdg./0,08 CuL (Oberwicklung) w_2 = 2 × 270 Wdg./0,17 CuL (bifilar)
	10 W:	EI 42 Dyn.-Bl. IV, wechselseitig geschichtet w_1 = 1220 Wdg./0,15 CuL (Oberwicklung) w_2 = 2 × 170 Wdg./0,3 CuL (bifilar)
Ausgangsübertrager Ü2	6,5 W:	EI 54, Dyn.-Bl. IV, wechselseitig geschichtet w_1 = 2 × 132 Wdg./0,46 CuL (bifilar) w_2 = 80 Wdg./0,75 CuL (Oberwicklung)
	10 W:	EI 54, Dyn.-Bl. IV, wechselseitig geschichtet w_1 = 2 × 125 Wdg./0,5 CuL (bifilar) w_2 = 110 Wdg./0,65 CuL (Oberwicklung)
Netztransformator Tr		EI 84a, Dyn.-Bl. IV, wechselseitig geschichtet w_1 = 1250 Wdg./0,3 CuL w_2 = 105 Wdg./1,0 CuL

Kurz sei daran erinnert, daß ein vierfacher Ausgangswiderstand doppelt und ein neunfacher dreimal so viele Windungen entsprechend dünneren Drahtes (wegen des Platzes!) erfordert. Nach den gleichen Gesichtspunkten muß auch der Gegenkopplungswiderstand R 12 (stark gezeichnet) verändert werden. Bei doppelter Windungszahl (= doppelte Ausgangsspannung) ist sein Wert ebenfalls zu verdoppeln usw.

Bei der Inbetriebnahme muß der Kollektor-Ruhestrom mit dem Einsteller P (Bild 68a) auf rund 15 mA gebracht werden.

4.2 Netzgespeister 2-Watt-Transistorverstärker

Mit dem Begriff „Transistorverstärker" verbindet man stets unterbewußt eine ganz extreme Sparsamkeit im Stromverbrauch. Man denkt nämlich stets an die Gegentakt-AB- oder B-Endstufen, deren Stromaufnahme von der gerade eingestellten Lautstärke abhängt. Bei Netzbetrieb, bei dem die Stromersparnis nur eine untergeordnete Rolle spielt, braucht man dagegen nicht mehr in Extremwerten zu denken, denn hier machen auch noch reine Eintakt-A-Verstärker vergleichbaren Endröhren den Rang streitig. Was aber besonders ins Gewicht fällt, ist die überaus einfache Schaltung.

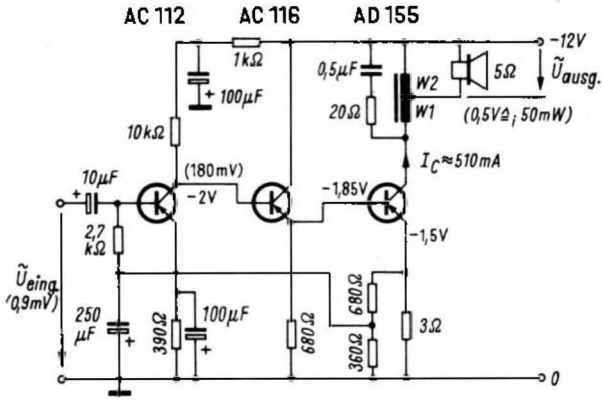


Bild 70. Eintakt-A-Verstärker mit drei Transistoren

Bild 70 zeigt einen vollständigen 2-Watt-Nf-Verstärker mit der Endstufe AD 155 (Telefunken-Angaben), der etwa die gleichen Eigenschaften aufweist wie ein röhrenbestücktes Gerät mit einem Triodensystem und der Endröhre EL 95. Das Gerät eignet sich als Nf-Teil für Heim-Rundfunkempfänger, als Lautsprecherverstärker in Übertragungsanlagen oder als Nf-Teil in Amateurfunk-Mobilanlagen (= Auto-Funksprechstationen). Mit 2 Watt kann man auch im schnellfahrenden Wagen Sprache so lautstark übertragen, daß sie die unvermeidlichen Fahrgeräusche sicher übertönt. Zur Speisung genügt im letztgenannten Fall die 12-V-

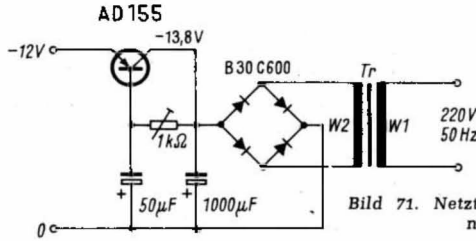


Bild 71. Netzteil für den Verstärker nach Bild 70

Fahrzeugbatterie, für Heimbetrieb empfiehlt sich das einfache Netzgerät, dessen Schaltung **Bild 71** wiedergibt. Die Wickelvorschriften des Ausgangsübertragers von Bild 70 und des Netztransformators von Bild 71 sind in **Tabelle 6** zusammengestellt.

Tabelle 6. Wickeldaten für die Bilder 70 und 71

Ausgangsübertrager	EI 42, Dyn.-Bl. IV, einseitig geschichtet (ohne Zwischenlage) w 1 = 130 Wdg./0,5 CuL w 2 = 150 Wdg./0,5 CuL
Netztransformator Tr	M 55, Dyn.-Bl. IV w 1 = 3000 Wdg./0,16 CuL w 2 = 195 Wdg./0,7 CuL

4.3 Eisenloser Transistor-Endverstärker mit 16 Watt Sprechleistung

Besonders aktuell sind Transistor-Verstärker, die völlig ohne Übertrager auskommen. Sie umgehen also einen Qualitäts-Engpaß (nämlich den oder die Übertrager), der bei entsprechender Güte kostspielig ist und der viel Gewicht beansprucht. Eisenlose Endstufen (z. B. mit zwei Endröhren EL 86) wurden schon bei Röhrengeräten benutzt, aber sie konnten sich nicht so recht durchsetzen, weil die zugehörigen Lautsprecher Schwingspulen mit 800 Ω haben mußten. Wegen der erforderlichen sehr dünnen Drähte waren sie störanfälliger als die allgemein üblichen 5-Ω-Systeme.

Transistoren mit ihren im Vergleich zu Röhren wesentlich niedrigeren Innenwiderständen erlauben den Entwurf eisenloser pnp/pnp-Serien-Gegentakt-Endstufen, die unmittelbar zum Anschluß normaler 4-Ω-Lautsprecher geeignet sind. **Bild 72** gibt die

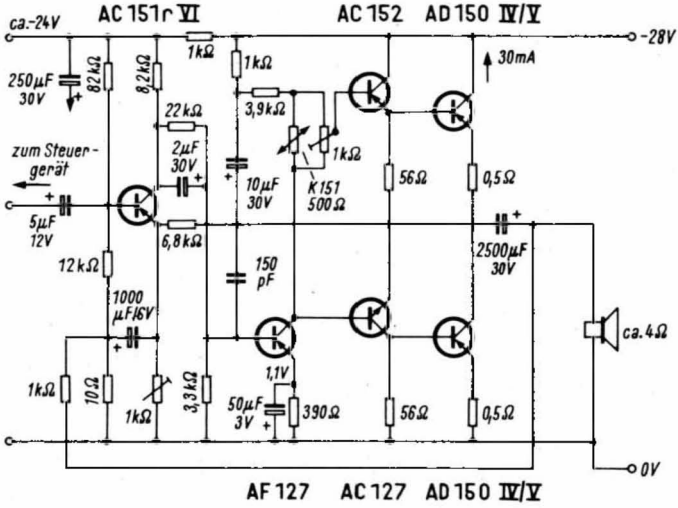


Bild 72. Eisenloser Transistor-Endverstärker

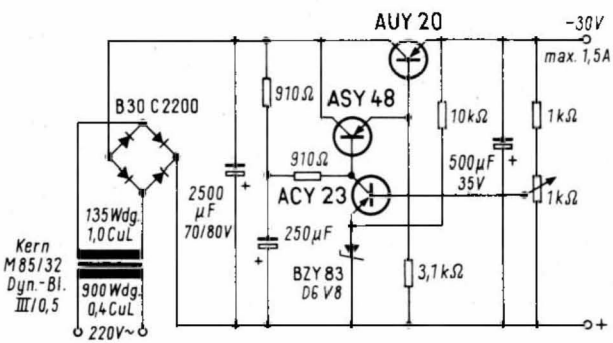


Bild 73. Netzteil für den Verstärker nach Bild 72

Schaltung eines von Siemens vorgeschlagenen Endverstärkers mit 16 W Sprechleistung wieder, den man z. B. unmittelbar in ein Lautsprechergehäuse einbauen und durch ein vorgeschaltetes

Steuergerät ansteuern kann. Der Klirrfaktor liegt bei 16 W Sinus-Dauerleistung bei rund 1 %, so daß dieses Gerät auch sehr hochgeschraubte Ansprüche befriedigt. Die Schaltung eines dazu passenden Stromversorgungsteiles geht aus **Bild 73** hervor und die Wickeldaten des Netztransformators aus **Tabelle 7**.

Tabelle 7. Wickeldaten für Bild 73

Netztransformator	M 85 a, Dyn.-Bl. IV/0,35
	w 1 = 1350 Wdg./0,33 CuL
	w 2 = 200 Wdg./1,0 CuL

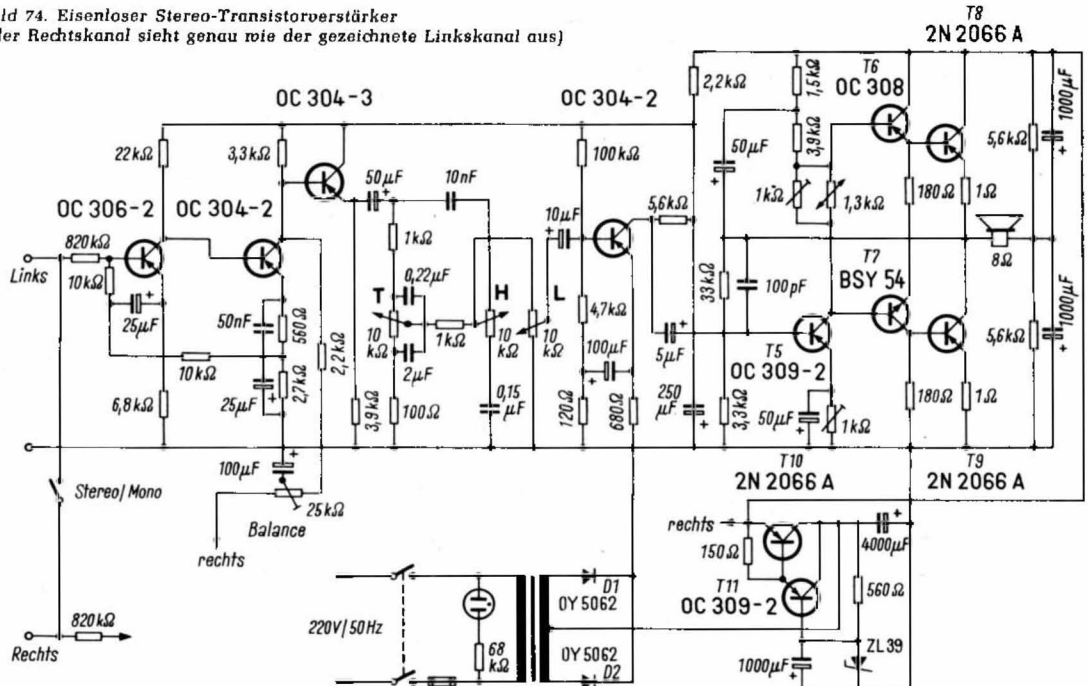
4.4 Eisenloser Stereo-Transistorverstärker mit 2 × 12 Watt Sprechleistung

Die Schaltung für einen Stereo-Verstärker mit Klangeinstell-Netzwerk gibt Intermetall nach **Bild 74** an. In den Vorstufen arbeiten drei galvanisch gekoppelte Transistoren, bei denen eine Gleichstromgegenkopplung zwischen Emitter der zweiten und Basis der ersten Stufe die Arbeitspunkte stabilisiert. Für hohen Eingangswiderstand sorgen der nicht überbrückte Emitterwiderstand der ersten Stufe und der Basis-Längswiderstand von 820 kΩ.

Das anschließende Klangeinstell-Netzwerk mit den Potentiometern T (Tiefen), H (Höhen) und L (Lautstärke) arbeitet auf den Folgetransistor OC 304–2. Die erzielbaren Klangeinstell-Kurven sind in **Bild 75** dargestellt.

Der Endverstärker ist mit fünf Transistoren bestückt. Der Spannungsteiler an der Basis von T 5 steht mit dem Verstärkerausgang in Verbindung, was zu einer kräftigen Gegenkopplung führt, die die Arbeitspunkte stabilisiert und den Frequenzgang linear macht. Die Arbeitspunkte der Endtransistoren stellt man mit den Trimmpotentiometern von je 1 kΩ ein, der Einsteller im Emitterzweig von Transistor T 5 dient zum Symmetrieren des Verstärkers, und mit dem Einsteller zwischen den Basisanschlüssen der Transistoren T 6 und T 7 wird der Ruhestrom der Endstufe auf rund 100 mA festgelegt. Die Wickeldaten des Netztransformators sind in **Tabelle 8**, die Meßwerte des Mustergerätes in **Tabelle 9** und die Kurven für Klirrfaktor und Ausgangsleistung in **Bild 76** zusammengefaßt.

Bild 74. Eisenloser Stereo-Transistorverstärker
(der Rechtskanal sieht genau wie der gezeichnete Linkskanal aus)



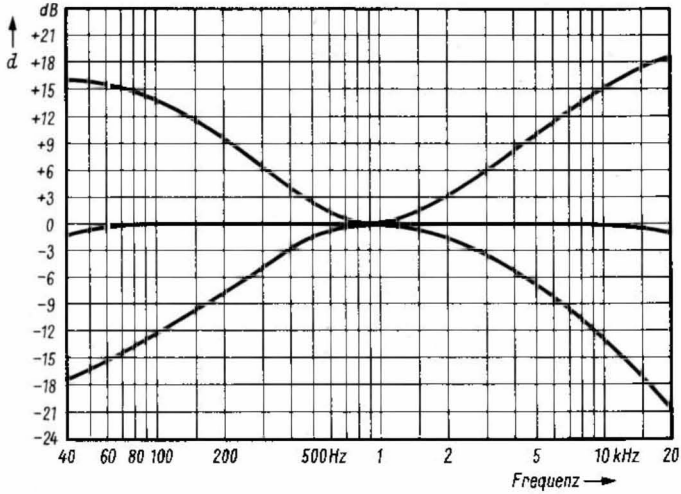


Bild 75. Klangeinstellkurven des Verstärkers nach Bild 74

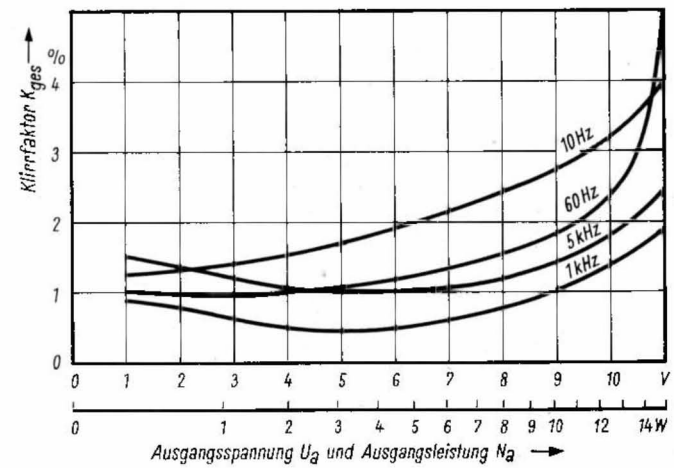


Bild 76. Klirrfaktorkurven des Verstärkers nach Bild 74

Tabelle 8. Wickeldaten für Bild 74

Netztransformator	M 85/32, Dyn.-Bl. IV ohne Luftspalt w 1 = 1000 Wdg./0,35 CuL w 2 = 2 × 160 Wdg./0,75 CuL

Tabelle 9. Technische Daten zu Bild 74

Frequenzbereich	40 Hz ... 20 kHz
Tiefeneinstellung 60 Hz	± 15 dB
Höheneinstellung 12 kHz	± 15 dB
Balancebereich	± 6 dB
Klirrfaktor bei 1 kHz/12 Watt	< 1,5 %
Eingangswiderstand	1 MΩ
Übersprechdämpfung	> 40 dB
Leistungsaufnahme bei Leerlauf	25 VA
desgl. bei Vollast	55 VA

Der zweite Kanal ist in Bild 74 nicht dargestellt, er entspricht genau dem gezeichneten Linkskanal.

4.5 Eisenloser Transistorverstärker mit Komplementär-Endstufe

Der Verstärker nach **Bild 77** ist mit dem Germanium-Komplementär-Transistorpaar AC 175/ AC 117 in der Endstufe und mit dem Silizium-Transistor BC 130 in der Vor- und Treiberstufe be-

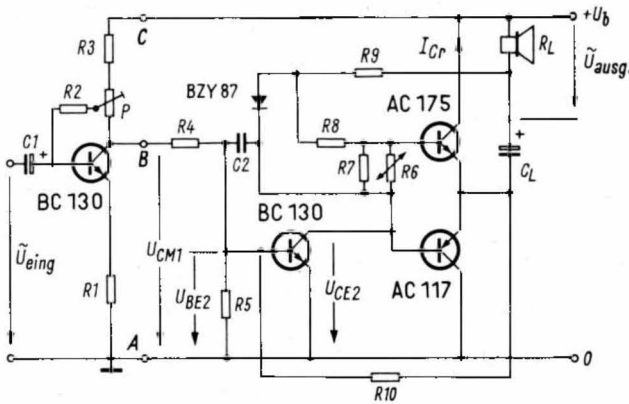


Bild 77. Eisenloser Transistorverstärker mit Komplementär-Endstufe

stückt. Weil sich dadurch eine ungewöhnlich einfache Schaltung ergibt, die je nach Betriebsspannung 1 – 1,5 – 2,5 oder 3,5 W Sprechleistung liefert, kommt ein solcher Verstärker sowohl für Batterie- als auch für Netzspeisung in Betracht. Die entsprechenden Bemessungen nennt **Tabelle 10.**

Den Frequenzgang im Bereich der Tiefen bestimmen allein die Werte der Kondensatoren C 1 und C_L. Weil gute Tiefenwiedergabe die meiste Sprechleistung verschlingt, hat man es bis zu einem gewissen Grad in der Hand, z. B. durch Verkleinern des Kondensators C 1 überflüssige Bässe fernzuhalten und damit die Aussteuerbarkeit der übrigen Töne zu erhöhen. Das führt selbst bei nur 1 Watt Sprechleistung zu beträchtlichen Schalldrücken, und die Erfahrung zeigt, daß etwa ein 9-cm-System in einer Funksprechanlage dabei auch starken Nebenlärm übertönt.

Tabelle 10. Technische Daten zu Bild 77

U_b	P_{out}	R_L	$r_{Eingg.}$	f_u	f_o	R1	R2	R3	R4	R5	R6 [1]	R7
V	W	Ω	kΩ	Hz	kHz	Ω	kΩ	kΩ	kΩ	kΩ	Ω	Ω
6	1	2	3	30	17	22	68	4,7	1	2,2	130	240
9	1,5	5	5	40	16	47	82	10	1	1,8	130	240
12	2,5	5	4	25	16	47	56	12	1	2,2	130	240
16	3,5	10	3	25	16	47	47	15	1	1,8	130	240

R8	R9	R10	P	C1	C2	C_L	Kühlfläche 45°C	Kühlfläche 60°C
Ω	Ω	kΩ	kΩ	µF	pF	µF	cm²	cm²
150	150	15	1	1	500	2500	20	70
150	470	33	0,25	1	250	1000	16	50
150	390	27	0,5	1	250	2500	80	—
180	820	47	0,5	1	160	1000	130	—

[1] NTC-Widerstand: B 832 001 P / 130 E

Die Silizium-Diode BZY 87 stabilisiert den Kollektor-Ruhestrom in der Endstufe bei Batteriespannungs-Schwankungen und der NTC-Widerstand stabilisiert gegen Temperaturschwankungen. Den Arbeitspunkt der Vor- und Treiberstufe stellt man mit dem Potentiometer P so ein, daß bei Vollaussteuerung ein

angeschlossener Oszillograf (parallel zum Lautsprecher) ein gleichmäßiges Abkappen der Spitzen einer Sinuswelle anzeigt. Zu beachten ist die Größe der erforderlichen Kühlbleche bei den Endtransistoren, die für Umgebungstemperaturen von 45 und 60 °C und für 2 mm starkes Aluminiumblech ebenfalls aus Tabelle 10 hervorgeht.

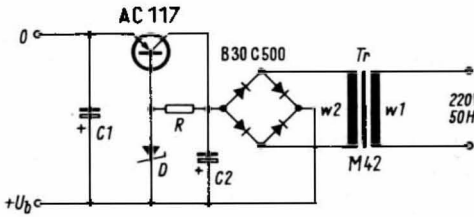


Bild 78. Netzteil für den Verstärker nach Bild 77

Für die Betriebsspannungen von 9, 12 und 18 V schlägt Telefunken ein Netzgerät nach **Bild 78** vor, dessen Daten in **Tabelle 11** zusammengestellt sind.

Tabelle 11. Technische Daten zu Bild 78

U_b V	w 1 Wdg.	d1 (CuL) mm	w2 Wdg.	d2 (CuL) mm	C1 µF	C2 µF	D	R Ω
9	4300	0,12	230	0,45	100	2500	BZY 85 / C 9 V 1	330
12	4300	0,12	300	0,4	100	2500	BZY 85 / C 12	330
18	4300	0,12	420	0,35	100	2500	BZY 85 / C 18	470

4.6 Röhren-Mischverstärker ZV 28 für den Selbstbau

Dieses Gerät wurde speziell für den Selbstbau entworfen. Auch der wenig geübte Praktiker kann kaum etwas falsch machen, noch nicht einmal dann, wenn er andere als die empfohlenen Röhren verwendet. Das Schaltungsprinzip beweist das im Abschnitt 1 Gesagte, nämlich daß eine Schaltung an sich unter Umständen auch noch nach vielen Jahren modern sein kann, vorausgesetzt, man verwendet inzwischen auf den Markt gekommene bessere Bauelemente. Fast nach der gleichen Grundschaltung, aber mit älteren Röhren und noch mit Röhrengleichrich-

tung, waren die Vorläufertypen ZV 26, ZV 26 d und ZV 27 aufgebaut. Als der Verfasser nach einer moderneren Lösung bei gleicher Bausicherheit suchte, entstand die Schaltung nach **Bild 79.**

Der Kniff des Entwurfes besteht darin, daß in den Vorstufen ausschließlich Trioden oder als Trioden betriebene Pentoden Verwendung finden. Dadurch ergeben sich für diese Stufen Wertbemessungen, die auch bei geänderter Bestückung noch hinreichend genau stimmen. Im Gegensatz zu Industrieschaltungen, bei denen aus Kostengründen gern alle Röhren bis aufs Letzte ausgenutzt werden, braucht man hier vielleicht eine Stufe mehr. Dafür handelt man aber ein hohes Maß an Bausicherheit ein, und das wirkt sich beim Praktiker, der in der Regel nur ein Einzelstück baut, kostensparender aus als der Preis einer Röhre ausmacht. Hinzu kommt, daß man jetzt in den Vorstufen (Rö 1 bis Rö 4) nahezu jede beliebige und gerade vorhandene Type in Triodenschaltung benutzten kann, also nicht nur reine Trioden (z. B. EC 92), sondern auch alle Pentoden, die durch Zusammenschalten von Anode und Schirmgitter als Trioden betrieben werden. Notfalls lassen sich sogar die Doppeltrioden Rö 2 und Rö 4 entsprechend „auflösen", wenn man unbedingt vorhandene Typen aus dem Vorrat verbrauchen möchte. Die Röhren EF 86 und ECC 83 sind besonders gut durch die älteren Ausführungen EF 40 und ECC 40 zu ersetzen, und nach Möglichkeit sollte man wenigstens für die Röhren Rö 1 und Rö 2 bei diesen beiden Bestückungsmöglichkeiten bleiben.

Die Schaltung enthält aber noch einen zweiten Kniff: Auch in der Bestückung der Gegentakt-Endstufe ist für Freizügigkeit gesorgt. In gewissen Grenzen kann man die Sprechleistung durch die Wahl anderer Endröhren selbst bestimmen, sofern man dann auch die elektrischen Daten nach **Tabelle 12** in der Endstufe und im Netzteil an die neuen Betriebsbedingungen anpaßt. Hierzu ist einiges Grundsätzliches zu bemerken:

Daß der gemeinsame Katoden- (R 1) und der Schirmgitterwiderstand (R 2) den Röhrendaten entsprechen müssen, versteht sich von selbst. Eine Besonderheit ist beim Verwenden der US-Endröhre 6 L 6 zu beachten. Bei dieser ist die Schirmgitterspannung wesentlich niedriger als die Anodenspannung, weil aber bei dem vorgesehenen AB-Betrieb ein hochohmiger Vorwider-

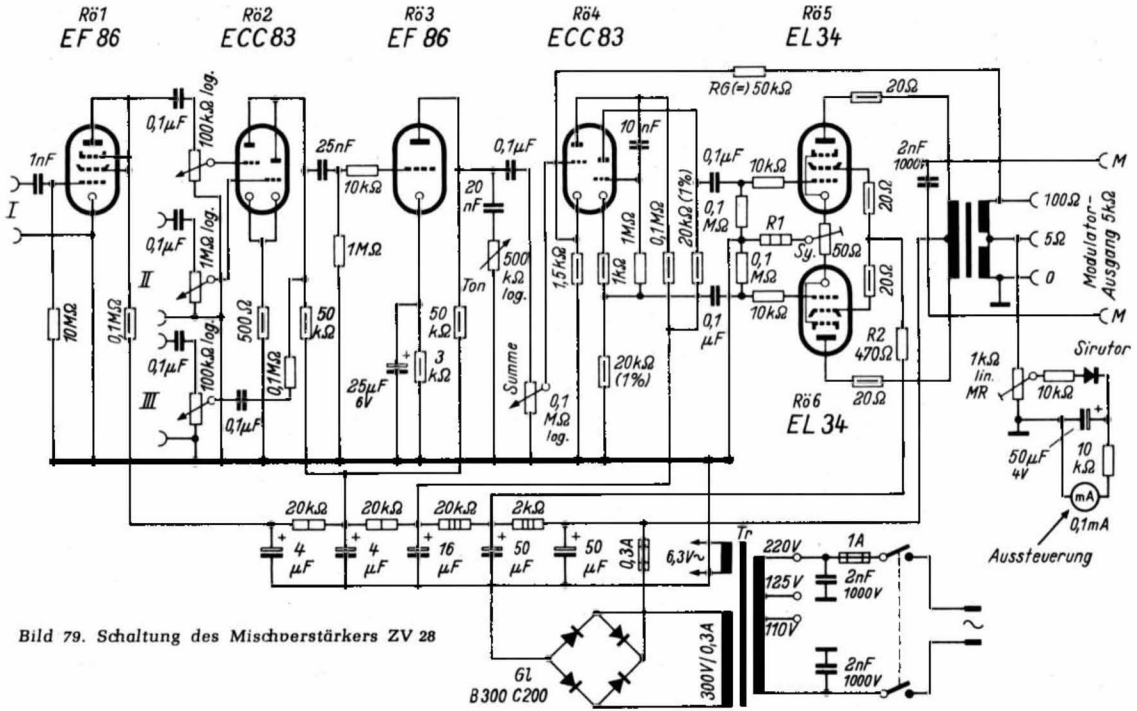


Bild 79. Schaltung des Mischverstärkers ZV 28

stand R 2 eine lautstärkeabhängige („weiche") Spannung brächte, muß in diesem Sonderfall eine Stabilisatorröhre für konstante Spannung sorgen. Deshalb ist der Widerstand R 2 durch die Glimmröhre OC 3 (Valvo) zu ersetzen. Stabilisator-Röhren mit gleichen Eigenschaften bekommt man häufig sehr billig aus US-Beständen unter der Armee-Bezeichnung VR 105.

Beim Netztransformator muß die Spannung der Anodenwicklung genau eingehalten werden, während für die Belastbarkeit nach oben keine Grenzen bestehen. Der Gleichrichter kann für beide Werte (Strom und Spannung) höhere Angaben aufweisen.

Wenn man den Ausgangsübertrager auswählt, muß der Händler den Anpassungswert von Anode zu Anode sowie die Mindestbelastbarkeit wissen. Diese Angaben enthält die vorletzte Tabellenzeile. Die Ohmzahl auf der Sekundärseite hängt dagegen weitgehend vom Verwendungszweck und den persönlichen Wünschen ab. Wird nur e i n Lautsprecher angeschlossen, dann genügt ein einziger 5-Ω-Ausgang. Wer noch einen zusätzlichen 100-V-Ausgang für Übertragungsanlagen wünscht, findet die zugehörigen Scheinwiderstandswerte in der untersten Zeile der Tabelle. Nähere Auskünfte hierüber gibt Band 43 der Radio-Praktiker-Bücherei, „Musikübertragungs-Anlagen". Vielleicht ist noch nachzutragen, daß die Originalschaltung einen Ausgangsübertrager für 3,4 kΩ/35 W und für einen 100-V-Anschluß von 300 Ω verlangt.

Tabelle 12. Daten für Bild 79 bei Ersatzbestückung

	2 × EL 84	2 × EL 12 (spezial)	2 × 6 V 6	2 × 6 L 6	2 × EL 503
Sprechleistung (W)	17	35	13	40	40
R 1 (Ω)	130	125	50	125	56
R 2 (Ω)	0	50	50	OC 3/VR 105	0
Tr (sec.V/mA)	1×250/150	1×300/150	1×250/100	1×350/150	1×250/350
Gl (V/mA)	250/150	300/150	250/100	350/150	350/350
Ü (prim. kΩ/W)	8/17	5/35	8/13	6/40	2,4/40
Ω für 100-V-Ausgg.	600	300	800	250	250

Noch ein Wort zur Röhrenbestückung: Wer die veraltete Type EL 12 spezial preiswert bekommen kann, trifft keine schlechte Wahl. Ihre Anodenanschlüsse befinden sich oben auf dem Glas-

kolben. Dadurch ergeben sich extrem kurze Zuleitungen zum Ausgangsübertrager, der unmittelbar daneben auf dem Chassis befestigt ist. An Stelle von Litzen benutzt man zweckmäßig die erforderlichen UKW-Schwingschutzwiderstände zu 20 Ω, und weil das sowieso vorhandene Chassisblech eine ideale Abschirmung zwischen Gitter- und Anodenleitung bildet, erhält man einen besonders rückwirkungsarmen Aufbau.

Die Eingangs-Mischkanäle I bis III sind für unterschiedliche Empfindlichkeiten ausgelegt. Bei I (= ca. 2 mV an 10 MΩ) kann man Kristallmikrofone oder Tauchspultypen mit eingebautem Aufwärtsübertrager anschließen. Eingang II eignet sich für Tonbandgeräte oder Tonabnehmer (= 40 mV an 1 MΩ) und Eingang III (= ca. 1 V an 100 kΩ) ist für Tuner oder Kabelleitungen bestimmt. Damit erfaßt man alle Pegel, die normalerweise dem Praktiker zur Verfügung stehen. Die eigentliche rückwirkungsfreie Mischung erfolgt an den parallel geschalteten Anoden der Doppelröhre Rö 2. Dort ist auch der Entkopplungswiderstand des Einganges III (100 kΩ) angeschlossen, und das (in der Zeichnung) linke Ende des 10-kΩ-Längswiderstandes bildet den Knotenpunkt der Mischordnung.

In der Röhre Rö 3 erfolgt eine Nachverstärkung. Anschließend kann man über einen Kondensator von 20 nF und den Toneinsteller (500 kΩ) die hohen Töne beschneiden und mit dem Summenpotentiometer die Gesamtlautstärke des gemischten Klangbildes bestimmen. Das erste System der Röhre Rö 4 bewirkt eine nochmalige Nachverstärkung, während das zweite System in einer sogenannten Katodyneschaltung die Phasenumkehr zum Ansteuern der beiden Gegentakt-Endröhren liefert.

In den Elektroden-Zuleitungen der Endröhren liegen UKW-Schwingschutzwiderstände (Gitter = 10 kΩ, Anode = 20 Ω, Schirmgitter = 20 Ω), die für stabiles Arbeiten sorgen. Die Katoden- (= R 1) und Schirmgitterwiderstände (= R 2) sind für beide Stufen-Hälften vereinigt. Weil die dort abfallenden Tonspannungen gegenphasig auftreten, kompensieren sie sich gegenseitig und erübrigen die sonst (= getrennte Widerstände) erforderlichen Kondensatoren gegen Masse. Mit dem Einstellwiderstand Sy (= Symmetrierung) lassen sich beide Endröhren auf genau gleichen Anodenstrom symmetrieren. Zu diesem Zweck

schließt man bei den Meßbuchsen M ein mA-Meter an und stellt das Potentiometer Sy so ein, daß das Meßinstrument gerade Nullausschlag zeigt. Bemessungs-Hinweise für den Gegenkopplungs-Widerstand gibt Abschnitt 5.1.

Die Buchsen M haben noch eine zweite Funktion: Sie bilden nämlich gleichzeitig einen hochohmigen Ausgang, der bei zwei Röhren EL 34 bei 3,4 kΩ liegt und der bei Ersatzbestückung nach Tabelle 12 zwischen 6 und 8 kΩ schwankt. Hier kann man auch einen Zwischenübertrager zur Modulation eines Amateursenders anschließen, der den Ausgang des Verstärkers ZV 28 an die Modulationsklemmen des Senders anpaßt. Da der Ausgangsübertrager im Verstärker über seine Mittelanzapfung den Gleichstromweg schließt, genügt zum Anpassen ein Zusatzübertrager ohne Luftspalt. Beispielsweise bewährt sich beim Verfasser zur Schirmgittermodulation eines 100-W-AM-Senders ein kleiner Netztransformator mit einer 250-V-Anodenspannung-Wicklung. Wenn man diese bei den Punkten M-M anschaltet, so erhält man an den Netzklemmen des Transformators ungefähr die richtige Modulationsspannung bei richtiger Anpassung.

Bisher wurde von Konstruktions-Kniffen in der Schaltung gesprochen. Ein dritter Kniff, der die Nachbausicherheit bestimmt, bildet die Anordnung vieler Bauelemente auf einer Lötösenleiste nach **Bild 80**. Hält man sich nämlich sowohl an diese Anordnung als auch an die grundsätzliche Platzverteilung auf dem Chassis nach **Bild 81**, so ergeben sich zwangsläufig äußerst kurze Verbindungen zwischen der Lötleiste und den Röhrenfassungen. **Bild 82** mag das verdeutlichen.

Der Aussteuerungsmesser kann natürlich auch wegfallen, aber er ist doch recht praktisch. Wer einen überzähligen Strommesser für 0,1 bis 1 mA Vollausschlag besitzt, wird ihn hier gern zweckmäßig verwenden. Als Meßgleichrichter eignet sich praktisch jede Diode. Die Instrumentenskala braucht keine Beschriftung zu tragen, es genügt, wenn man ihr letztes Drittel (= Übersteuerung) rot markiert. Bei Inbetriebnahme wird der Verstärker so laut eingestellt, daß gerade noch keine Verzerrungen hörbar sind. Dann ist mit MR der Instrumentenausschlag genau auf Beginn des roten Feldes zu bringen. In Zukunft weiß man auch ohne Mithörlautsprecher, z. B. bei Außenübertragungen,

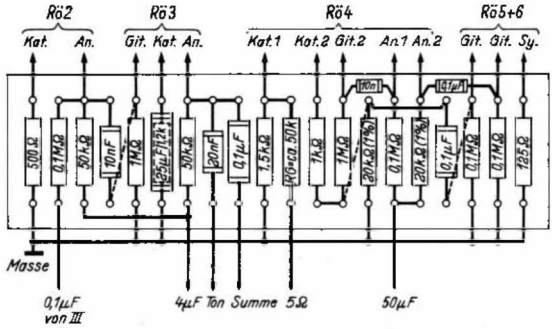
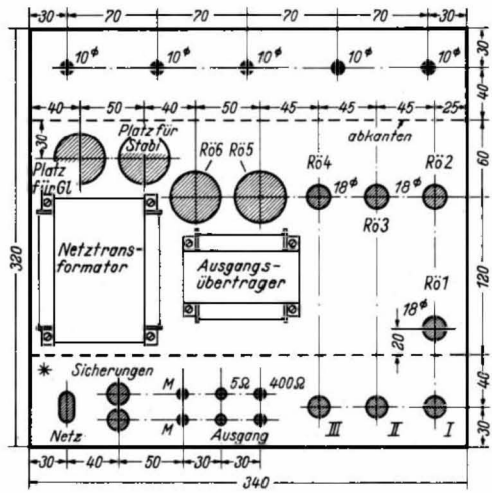


Bild 80. Die Bestückung der Hartpapierleiste im ZV 28



* Alle Bohrungen und Röhrenfassungen richten sich mit ihren Durchmessern nach den gewählten Buchsenfabrikaten

Bild 81. Chassisplan des Verstärkers ZV 28

daß nie so laut „aufgedreht" werden darf, daß der Zeiger in das rote Feld spielt.

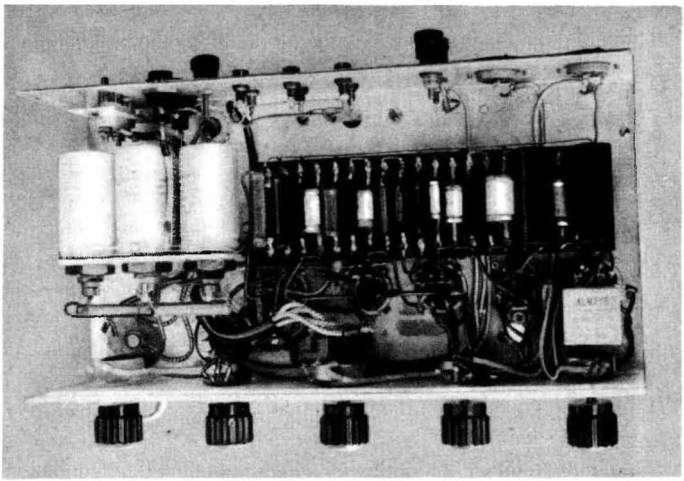


Bild 82. Die Chassisunteransicht zeigt den einfachen Aufbau des Verstärkers ZV 28

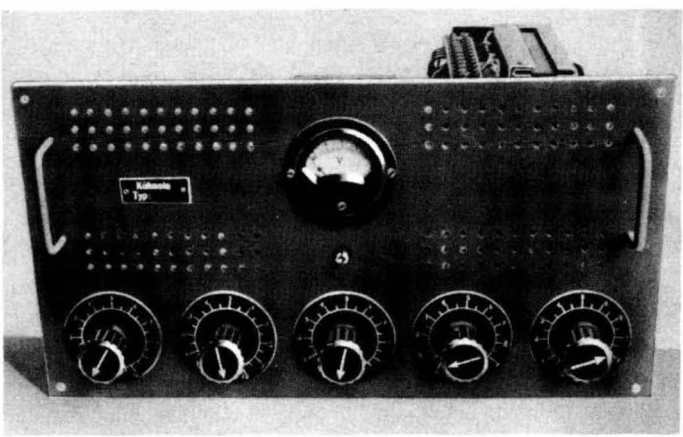


Bild 83. Der stabile Aufbau mit der teilweise zur besseren Entlüftung gelochten Frontplatte ist hier gut zu erkennen

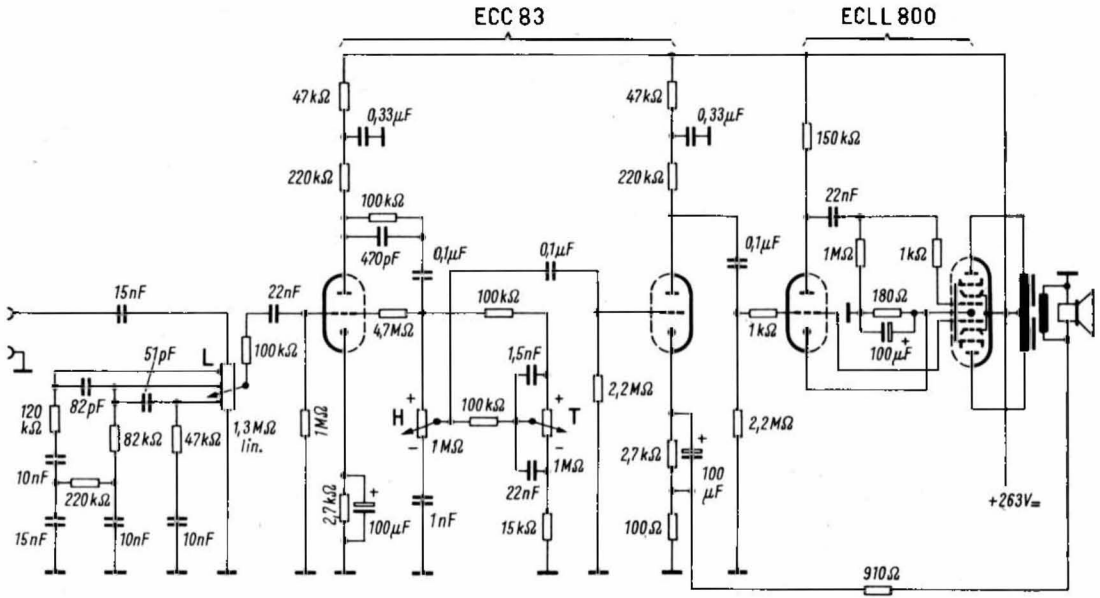


Bild 84. Zwei-Röhren-Verstärker mit Gegentakt-Endstufe und 8 Watt Sprechleistung

Den konstruktiven Abschluß des Gerätes bildet die 3-mm-Dural-Frontplatte nach **Bild 83**, die 37 cm × 19 cm groß ist und seitlich zum Festschrauben in einem Gestell oder Gehäuse ein wenig übersteht. Selbstverständlich sind auch alle anderen Anordnungen denkbar, aber der Praktiker erspart sich viel Mühe, wenn er die Lötösenleiste nach Bild 80 und die Platzverteilung auf dem Chassis nach Bild 81 für eigene Konstruktionen zu Grunde legt.

4.7 Zwei-Röhren-Verstärker mit 8 Watt Sprechleistung

Die Verstärkerschaltung nach **Bild 84** ist überraschend sparsam aufgebaut, denn trotz gehörrichtiger Lautstärkeeinstellung und zusätzlicher Höhen- und Tiefenbeeinflussung kommt sie mit nur zwei Röhren aus.

Mit dem gehörrichtig angezapften Lautstärkeeinsteller L erhält man die Frequenzkurven nach **Bild 85**. Die hohen und tiefen Töne sind also entsprechend der gerade eingestellten Lautstärke so angehoben, wie es unserer Gehörempfindlichkeit entspricht. Hinzu kommt das Netzwerk H und T für die Geschmacksentzerrung, das eine weitere Klangbeeinflussung nach **Bild 86** zuläßt. Beide Korrektur-Netzwerke führen zu einem hohen Standard klanggetreuer (= Hi-Fi-) Wiedergabe. Die SEL, die diese Schaltung vorschlägt, nennt dafür Frequenzbereiche zwischen 30 Hz und 15 kHz bei einem 1000-Hz-Klirrfaktor unter 2 %.

4.8 Zwei-Kanal-Röhrenverstärker mit 15 + 5 Watt Sprechleistung

Dieser Verstärker teilt nach dem Prinzip von Bild 66 den abzustrahlenden Frequenzbereich in zwei Kanäle auf, die Tiefen, sowie mittlere und hohe Töne abstrahlen (**Bild 87**). Für die Tiefen ist jeder Lautsprecher geeignet, der bis 40 Hz heruntergeht und der bis über einige kHz hinauf verwendbar ist. Die Höhen übernehmen Systeme, deren Abstrahlung bei ungefähr 2 kHz beginnt. Ob man im Netzteil die Gleichrichterröhre beibehält oder besser einen Netztransformator für 1 × 250 V mit einem Selen-Brückengleichrichter benutzt, hängt von den gerade vorhandenen Bauteilen ab. Ähnliches gilt auch für die Hochtonsysteme. Das Originalgerät enthielt zwei 8-Ω-Lautsprecher in Parallelschaltung. Natürlich sind alle Systeme und Kombinatio-

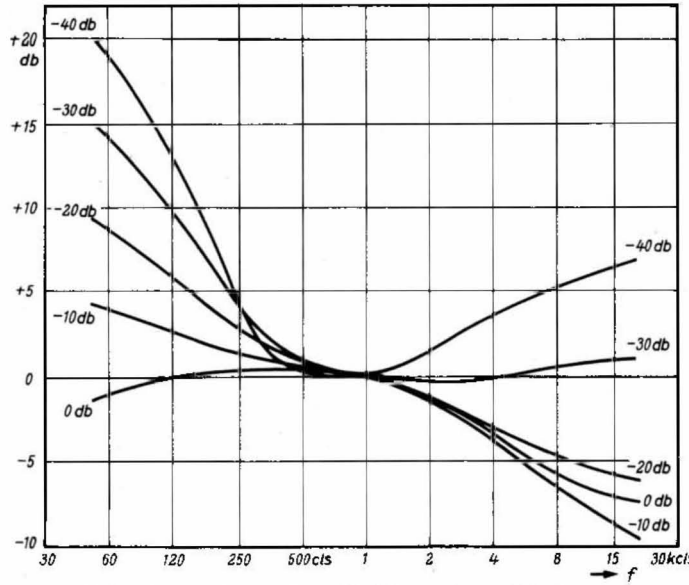


Bild 85. Frequenzkurven des gehörrichtigen Lautstärkeeinstellers im Verstärker nach Bild 84

nen geeignet, sofern sie dem Ausgangs-Scheinwiderstand des Hochtonübertragers (hinter der Röhre 1 × EL 84) entsprechen. Vor dem Netzteil zweigt eine Leitung zum Motor des Plattenspielers ab.

4.9 40-Watt-Röhrenverstärker mit niedriger Anodenspannung

Eine neu entwickelte Endröhre gibt in Gegentakt-AB-Schaltung bei nur 265 V Anodenspannung 40 Watt Sprechleistung ab; es ist die Pentode EL 503. Für den Konstrukteur ist niedrige Anodenspannung deshalb ein wichtiges Argument, weil er im Netzteil mit handelsüblichen Elektrolytkondensatoren auskommt. Selbst bei sehr großzügigem Sicherheitsabstand erweisen sich die normalen 500-V-Typen in jeder Weise als ausreichend.

Betrachtet man **Tabelle 13**, die die Betriebsdaten der bekannten Endröhre EL 34 mit denen der neuen Type EL 503 vergleicht,

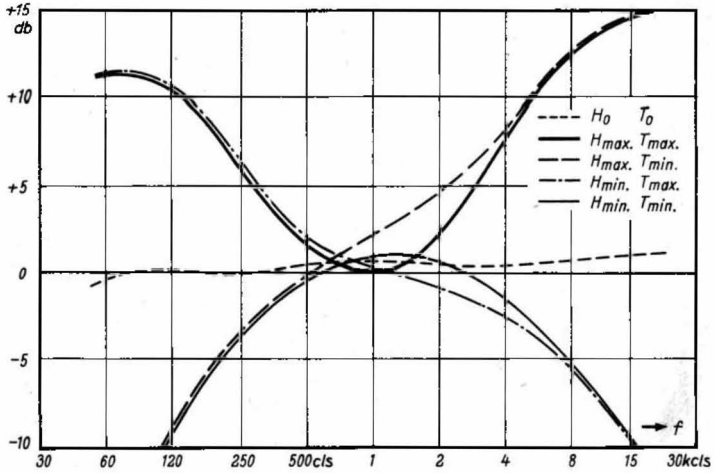


Bild 86. Frequenzkurven für verschiedene Einstellungen der Potentiometer H und T im Verstärker nach Bild 84

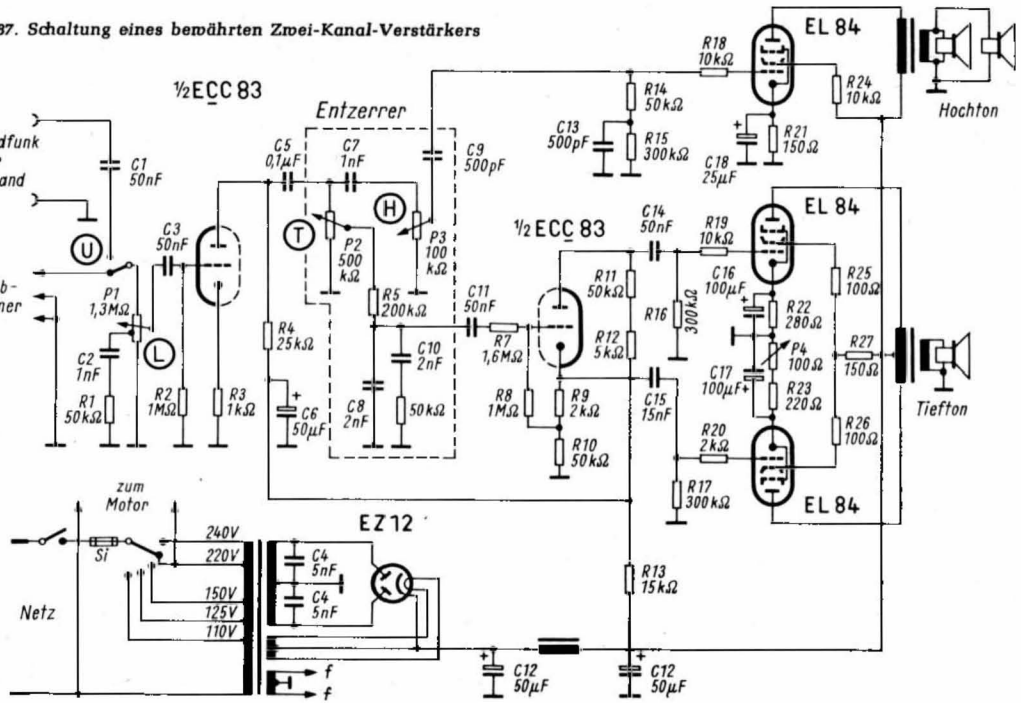
dann erkennt man noch weitere Vorteile: Die erforderliche Steuerspannung $U_{i\,eff}$ ist niedriger (= geringere Vorstufen-Verzerrungen), und man braucht auch einen kleineren Außenwiderstand (R_{aa}) zwischen beiden Anoden. Das vereinfacht den Ausgangsübertrager (= weniger Primärwindungen).

Tabelle 13. Betriebsdaten der Röhren EL 34 und EL 503 für Gegentakt-AB-Betrieb

	EL 34		EL 503		
R_{aa}	3,4		2,4		kΩ
R_{g2}	470[1])		0		Ω
R_k	130[1])		561])		Ω
U_b	375		265		V
U_{bg2}	375		265		V
$U_{i\,eff}$	0	21	0	11,5	V
I_a	2 × 75	2 × 95	2 × 100	2 × 118	mA
I_{g2}	2 × 11,5	2 × 22,5	2 × 8,5	2 × 32,5	mA
P_o	0	35	0	40	W
K_{ges}	—	5	—	5	%

[1]) gemeinsamer Widerstand für beide Röhren

Bild 87. Schaltung eines bewährten Zwei-Kanal-Verstärkers



Die erste Versuchsschaltung mit diesen neuen Röhren stammt aus dem Valvo-Labor (**Bild 88**). Sie erhebt keinen Anspruch auf das Ausschöpfen aller denkbaren Vereinfachungsmöglichkeiten, denn sie wurde lediglich aufgebaut, um vorläufige Meßwerte zu erhalten. So fällt z. B. die etwas umständliche Teilschaltung mit der Röhre ECC 82 zum Erzeugen der Phasenumkehrung auf. Mit dem Potentiometer P 1 wird die Symmetrie beider Triodensysteme eingestellt (= gleiche Verstärkungsziffer) und der Einsteller P 2 erlaubt es, die Gegenkopplung so hoch zu treiben, daß gerade noch keine Selbsterregung eintritt. Die Parallel-RC-Glieder 1,5 kΩ/470 pF an der Anode der Vorröhre EF 86 sowie 2,7 kΩ/5 nF an der Primärseite des Ausgangsübertragers lassen zusammen mit dem Parallelkondensator von 820 pF am Einsteller P 2 erkennen, daß man vermutlich einen gerade vorhandenen einfachen Ausgangsübertrager benutzte und diese Korrekturen vorsah, um vorzeitiges Selbstschwingen zu unterdrücken. Darauf deuten auch die Hf-Drosseln an den Schirmgittern der Endstufe. Sie entsprechen den üblichen UKW-Fallen zum Unterdrücken von Selbsterregung im Hf-Bereich. Die **Bilder 89** und **90** zeigen Meßwerte dieser Versuchsschaltung.

Der Verfasser entwarf eine weitere Versuchsanordnung für einen ganz bestimmten Sonderzweck, die den niedrigen Anodenspannungsbedarf ganz bewußt kostensparend ausnutzt. Bei einigem Überlegen kommt man rasch darauf, daß man die erforderliche und sehr „harte" (= kein Zusammenbrechen bei Vollaussteuerung) Betriebsspannung von 265 V + rund 15 V (= Spannungsabfall am Katodenwiderstand) höchst einfach mit Hilfe einer einzigen Fernsehdiode BY 100 unmittelbar aus dem 220-V-Lichtnetz, also ohne Netztransformator, gewinnen kann. Lediglich zur Heizspannungsversorgung (6,3 V) braucht man einen billigen Heiztransformator.

Dadurch ergibt sich leider eine sogenannte Allstrom-Schaltung, bei der die Grundleitung Netzspannung führen kann (je nach Polung), die also berührungsgefährlich ist und die auch beim Anschluß über Trennkondensatoren viel unerwünschtes Brummen über nicht vermeidbare Schleifenbildung mit dem Netz einschleppt.

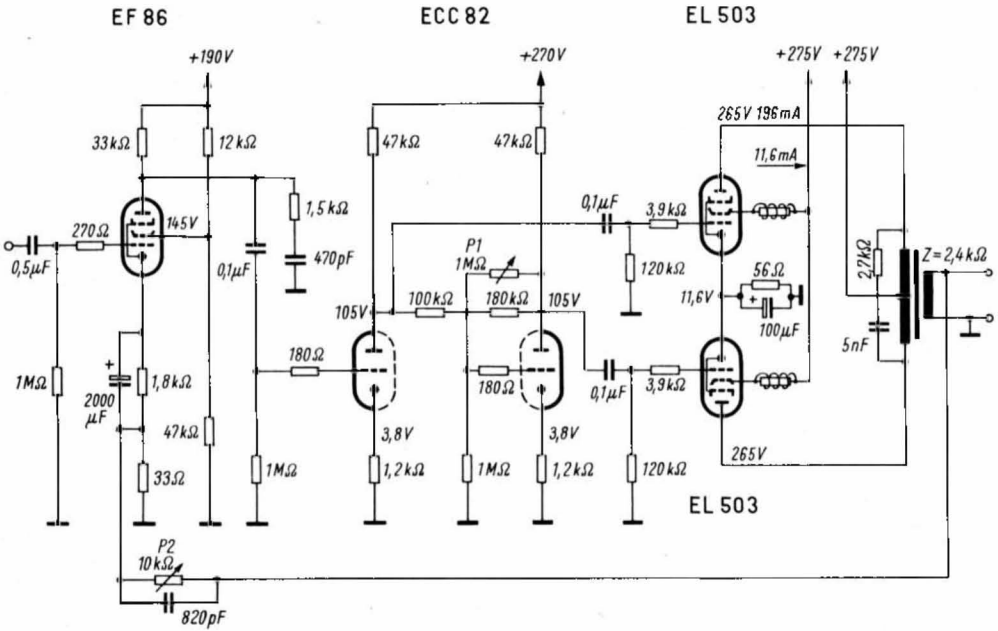


Bild 88. Schaltung eines Gegentaktverstärkers mit zwei Röhren EL 503 (nach Valvo-Angaben)

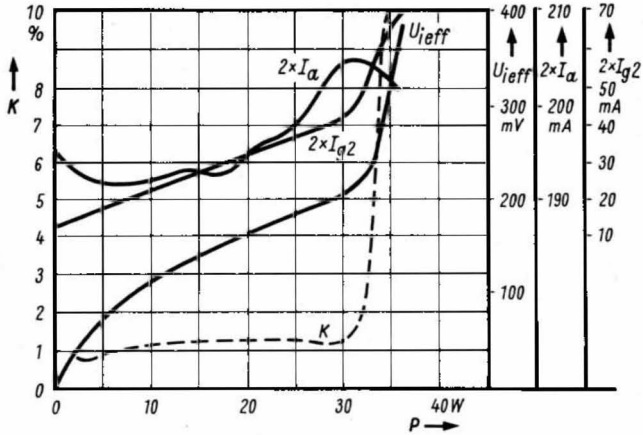


Bild 89. Anoden- und Schirmgitterströme, Eingangsspannung und Klirrgrad der Versuchsschaltung von Bild 88 in Abhängigkeit von der Ausgangsleistung

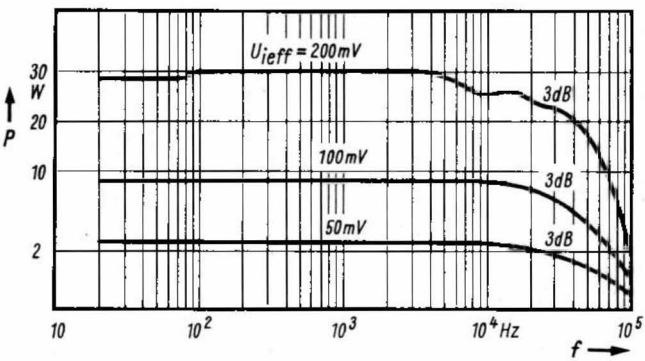


Bild 90. Leistungsfrequenzgang der Schaltung von Bild 88 bei verschiedenen Eingangsspannungen

Nun gibt es aber dagegen ein ganz einfaches Mittel, nämlich die Anwendung von Ein- und Ausgangsübertragern, die automatisch die galvanische Trennung sichern. Der Ausgangsübertrager ist ohnehin erforderlich, aber in der üblichen Schaltungstechnik zweigt dort die Gegenkopplung ab, weshalb der eine

Ausgangspol an Null, also im zur Diskussion stehenden Fall an einem Netzpol, liegen müßte. Das läßt sich umgehen, wenn man eine eigene Gegenkopplungswicklung vorsieht. Weil dort keine Leistung abzunehmen ist, kann sie platzsparend aus sehr dünnem Draht bestehen, Hauptsache, sie ist gut gegen die übrigen Wicklungen und gegen den Kern isoliert. Aber mit zwischengelegtem Ölpapier ist das leicht zu schaffen. Ihre Windungszahl ist beinahe uninteressant, weil man den Gegenkopplungsgrad ohnehin mit dem üblichen Gegenkopplungswiderstand bestimmt. Der Einfachheit halber wird man einfach eine Lage entsprechend vollwickeln.

Auch der Eingangsübertrager braucht kein Qualitätsengpaß zu sein, denn die Industrie beherrscht heute Frequenzbereiche zwischen 15 Hz und 25 kHz und darüber. Eine isoliert herausgeführte Schutzwicklung (oder Schutzfolie), die an der geerdeten Eingangsklemme liegt, unterdrückt weitgehend Brummschleifen. Die jahrelangen Erfahrungen des Verfassers mit solchen Schaltungen zeigten allerdings, daß dieses Verfahren nicht bis zu beliebig niedrigen Steuerspannungen klaglos funktioniert, man sollte es bei Pegeln verwenden, die wegen ihrer Höhe von Haus aus wenig störanfällig sind. Das ist beispielsweise bei den Normpegeln von 1 und 1,5 V der Fall, die ungefähr den Verhältnissen entsprechen, die auf normalen Telefonleitungen herrschen. Den gleichen Pegel führen die Ausgänge von Steuerverstärkern, so daß man die hier kurz umrissene Schaltung auf Lautsprecher-Endverstärker beschränken sollte. Das sind Verstärker, die man unmittelbar in Lautsprechergehäuse einbaut und zu denen nur die Steuerleitung führt. Extrem „fortschrittlich" Gesinnte mögen diese Lösung vielleicht schon wieder als antiquiert bezeichnen und darauf hinweisen, daß man heute bereits ähnliche Sprechleistungen mit Transistoren und noch klirrfaktorarmer erzeugen kann. Leider haben sie dabei vergessen, einen Blick in die Preislisten zu werfen. Eine billigere Lösung ist kaum denkbar, und was die Qualität anlangt, so zeigt bereits die Klirrfaktorkurve in Bild 89, daß man selbst bei Aussteuerung bis zu 30 Watt noch bei 1 % bleibt.

Bild 91 zeigt diese Versuchsschaltung. Der Eingangsübertrager bewirkt nicht nur die erforderliche galvanische Trennung, er er-

höht auch die Steuerspannung um den Wert, den später die Gegenkopplung wieder herabsetzt. Die Sekundärseite ist aus Stabilisierungsgründen mit 25 kΩ belastet. Das anschließende erste Triodensystem dient zur Nachverstärkung, in seine Katode wird die Gegenkopplung eingespeist. Im nächsten Triodensystem erfolgt in äußerst einfacher Weise die Phasendrehung zum Ansteuern der beiden Endröhren (= Katodyneschaltung). Große Kopplungskondensatoren in Verbindung mit ziemlich niederohmigen (120 kΩ) Gitterableitwiderständen, die beiden 5-kΩ-Gitter-Längswiderstände sowie das RC-Glied parallel zur Übertrager-Primärseite sorgen für die nötige Stabilität. Die beiden Drosseln an den Endröhren-Schirmgittern sind sogenannte UKW-Fallen, bestehend aus 100-Ω-Widerständen, über die man 30 Windungen CuL-Draht wickelt. Der Wert des Gegenkopplungswiderstandes hängt vom Aufbau des Übertragers ab, man muß die Ohmzahl selbst versuchsweise ermitteln (vgl. Abschnitt 5.1).

Aus der Schaltung geht deutlich die getrennte Gegenkopplungswicklung auf dem Ausgangsübertrager hervor, und man übersieht auch sofort die konkurrenzlos einfache Gestalt des Netzteils. Am Ladekondensator (unmittelbar hinter der Diode BY 100) bauen sich rund 285 Volt Gleichspannung auf. Sollte dieser Wert wider Erwarten stark überschritten werden, so ist der 5-Ω-Schutzwiderstand leicht zu erhöhen (10...15 Ω).

Die stark gezeichnete Nulleitung darf an keiner Stelle mit dem Gehäuse in Verbindung stehen, und sie darf auch von außen nicht berührbar sein. Wie man das konstruktiv verwirklicht, ist bis zu einem gewissen Grad Geschmacks- und Ansichtssache. Der Verfasser verfuhr wie folgt: Als Grundchassis dient ein vierseitig um 10 mm abgekantetes 1,5-mm-Alu-Blech (Abkanten sorgt für Verwindungssteifigkeit), auf das alle Bauelemente mit Ausnahme der drei Anschlußklemmenpaare (Eingang, Ausgang, Netz) genau so festgeschraubt wurden, als handle es sich um eine normale Wechselstromanordnung. Das Blech bildet also (wo es sich gerade ergibt) auch den Nulleiter und steht berührungsgefährlich mit einem Netzpol in Verbindung. Diesen Aufbau setzt man schließlich isoliert (!!) in das eigentliche Gehäuse ein. Hierzu eignen sich vorzüglich sogenannte 4-mm-Schwingelemente, die man in Spezialgeschäften für technischen Gummi-Be-

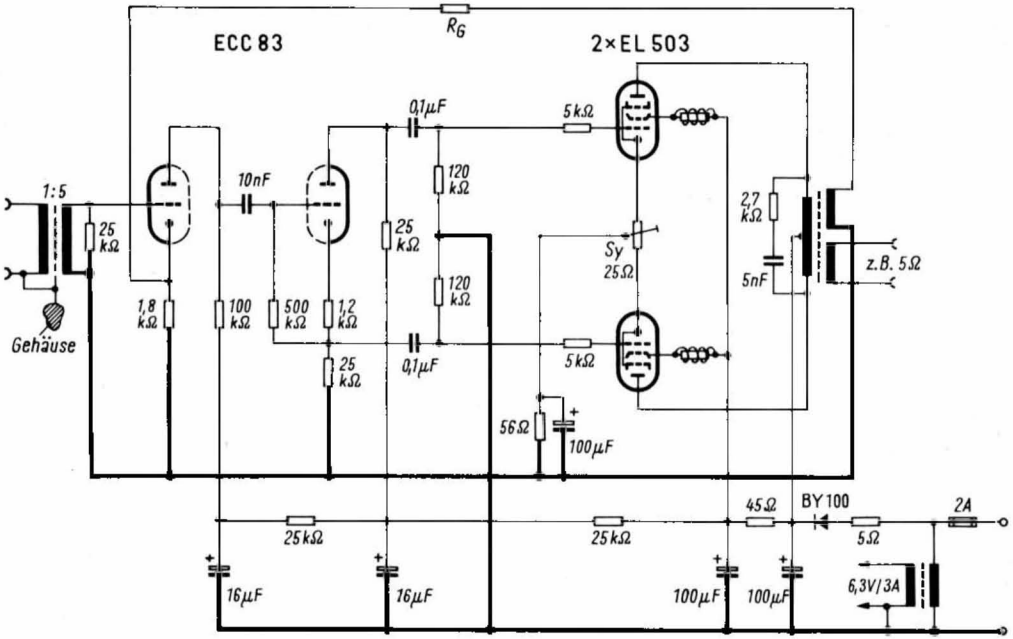


Bild 91. Schaltungsvorschlag für einen Lautsprecher-Endverstärker ohne Anodenspannungstransformator

darf für wenige Pfennige bekommt. Das sind Gummipfropfen, in die zwei gegenüberstehende aber sich nicht metallisch berührende Gewindebolzen einvulkanisiert sind. Am Gehäuse und Chassis müssen nur entsprechende 4-mm-Löcher gebohrt werden, und man befestigt dann mit Muttern die durchgesteckten Bolzen der Schwingelemente. Diese Befestigungsweise sichert nicht nur einwandfreie Isolation, sondern sie wirkt wegen der „schwimmenden" Verschraubung auch schallisolierend und hält etwaiges mechanisches Brummen des Heiztransformators mit Sicherheit vom Gehäuse fern (kein Mitschwingen!).

5 Praktischer Verstärkerbau

Der Selbstbau elektronischer Geräte setzt Erfahrungen voraus. Diese beginnen beim richtigen Löten und gehen über das Bestimmen der Belastbarkeit von Widerständen und Kondensatoren bis zum Finden der günstigsten mechanischen Konstruktion. Wollte man alle diese Dinge allein für den Verstärkerbau zu Papier bringen, so müßte man ein dickes Buch schreiben, und ganz bestimmt hätten weder Autor noch Leser ihre Freude daran. Wer nämlich halbwegs vollständig schreiben will, muß gewissermaßen „bei Adam und Eva" beginnen und Fragen behandeln, die dem Gros der Leser längst selbstverständlich sind. Daneben ist es aber auch so, daß eben Erfahrungen ein höchst persönlicher Schatz sind, und daß z. B. Konstruktionshinweise bis zu einem gewissen Grad Stilfragen bilden. Man kann also darüber geteilter Meinung sein. Der Verfasser beschränkt sich deshalb bewußt auf Teilprobleme, die besonders häufig in Leserbriefen zur Sprache kamen, und er hofft, auch hier die günstigste Auswahl zu treffen.

5.1 Sorgen mit der Gegenkopplung

Alle modernen Verstärker enthalten eine gegengekoppelte Endstufe, die manchmal beim Nachbau erheblichen Kummer bereitet. Wenn sie ordnungsgemäß arbeitet, soll sie den Frequenzgang linearisieren, den Klirrfaktor senken und für einen niedrigen dynamischen Ausgangswiderstand sorgen, der den angeschlossenen Lautsprecher an unerwünschten Schwingungen hindert. Leider macht sich aber die Gegenkopplung häufig durch weiter nichts als häßliches Quietschen und ähnliche Unarten bemerkbar. Woran liegt das?

Um das zu übersehen, muß man sich zunächst einmal in groben Zügen an die Zusammenhänge erinnern. Präzise Auskünfte gibt Band 48 der Radio-Praktiker-Bücherei, „Kleines Praktikum

der Gegenkopplung". Wir wollen uns hier jedoch mit einer ganz stark vereinfachten Darstellung begnügen.

Vor allem in der Nf-Vor- und Endstufe eines Verstärkers sowie im Ausgangsübertrager entstehen lineare und nichtlineare Verzerrungen. Mit anderen Worten: An den Lautsprecherklemmen L (**Bild 92**) erscheinen z. B. sehr tiefe und sehr hohe Töne schwächer, als sie im Verhältnis zu den Mittellagen am Eingang E vorhanden sind (= lineare Verzerrungen). Ebenso können an den Klemmen L Töne auftreten, die erst „unterwegs" im Verstärker selbst entstanden (= nichtlineare Verzerrungen) oder gar erst im Ausgangsübertrager (= Eisenverzerrungen). Diese Übel beseitigt (oder mildert) die stark eingezeichnete Gegenkopplung.

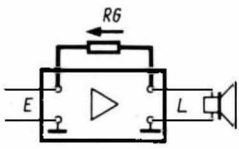


Bild 92. Prinzip der Spannungsgegenkopplung

Je nach Größe des Widerstandes RG gelangt ein mehr oder minder großer Teil der Ausgangsspannung zurück zum Eingang. Der Trick hierbei ist, daß man absichtlich und im Gegensatz zur bekannten R ü c k kopplung die Gegenspannung „falsch" gepolt zurückführt (= um 180° phasenverschoben). Sie kann also den Verstärker nicht zum Schwingen anfachen, sondern im Gegenteil, sie setzt die Eingangsspannung herab. Töne, die der Verstärker oder der Ausgangsübertrager benachteiligt, werden naturgemäß weniger gegengekoppelt als die Mittellagen und daher auch weniger geschwächt. Erfolg: Ihre Verstärkung ist kräftiger als die der Mittellagen, oder andersherum ausgedrückt, sie erscheinen an den Lautsprecherklemmen L im richtigen Verstärkungsverhältnis (Linearisierung der Frequenzkurve). Noch drastischer ergeht es den „Fremdtönen" (= nichtlineare Verzerrungen). Weil sie „falsch" gepolt zum Eingang zurückgelangen, löschen sie sich selbst im Verstärker wieder aus.

Zugegeben, diese übertriebene Vereinfachung mag dem theoretisch interessierten Leser nicht recht behagen, aber sie zeigt doch recht anschaulich, worauf es ankommt, nämlich darauf, daß die gewünschte „falsche" Polung entsteht. Vertauscht man nämlich versehentlich die Übertrageranschlüsse (von außen kann man das ja nicht ohne weiteres erkennen), dann schwingt das

Gerät und man hört nur ein übles Kreischen. In der Regel hilft Umpolen der Anschlüsse, wobei es meist bequemer ist, wenn man die Primärseite des Übertragers umlötet, denn damit erzielt man den gleichen Effekt wie beim Umpolen der Sekundärseite.

Leider hilft auch das manchmal nichts, und um den Grund besser erklären zu können, zeigt **Bild 93** die typische Gegenkopplungsschaltung in den Endstufen eines Verstärkers. Wie man deutlich erkennt, liegt der Gegenkopplungswiderstand nicht am Eingang E, sondern an der Katode der Vorröhre. Dort übt er nämlich den gleichen Einfluß aus, den er am Gitter hätte. Bekanntlich kann man Röhren an der Katode und Transistoren am Emitter genau so steuern wie am Gitter bzw. an der Basis, sofern die Steuerquelle (hier die Lautsprecherklemmen L) genügend niederohmig ist. Weil das zutrifft, macht man von dieser Schaltung gern Gebrauch, denn so entkoppelt man den Gegenkopplungskreis einwandfrei gegen die Steuerelektrode. Das Lautstärkepotentiometer P würde nämlich in Nullstellung oder in seinem unteren Einstellbereich die Gegenkopplungsspannung ganz oder teilweise kurzschließen.

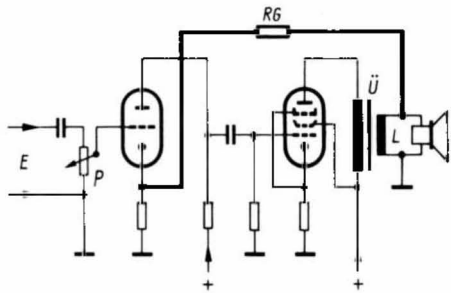


Bild 93. Gegenkopplung in einem Endverstärker

Wie schon mehrfach erwähnt, setzt eine richtig funktionierende Gegenkopplung eine genaue Phasendrehung der Ausgangsspannung von 180° gegenüber der Eingangsspannung voraus. Leider tut uns der Ausgangsübertrager Ü (Bild 93) nur selten diesen Gefallen. Nur wenn er vielfach verschachtelt gewickelt und demnach auch teuer ist, bleibt er halbwegs phasenlinear. Die meisten handelsüblichen Übertrager zeigen aber bei den höchsten Tönen merkliche Phasendrehungen. Das kann so weit führen,

daß die Gegenkopplung in diesem Bereich in eine Rückkopplung umschlägt und das schönste Pfeif- und Kreischkonzert hervorruft. Häufig unterdrücken das die Konstrukteure dadurch, daß sie parallel zum Gegenkopplungswiderstand RG einen Kondensator schalten, der die Phasenverschiebung wieder ausgleicht. Sie möchten nämlich RG möglichst klein, die Gegenkopplung also möglichst kräftig machen und ihre günstige Wirkung möglichst weit treiben. Bei Industrieschaltungen gelingt das auch, weil man dabei die Sicherheit hat, daß bei allen Exemplaren stets Ausgangsübertrager Verwendung finden, die nach der gleichen Wickelvorschrift gefertigt wurden, und daß auch die Verdrahtung mit ihren Nebenkapazitäten immer gleiche Werte aufweist. Beim Nachbau sind aber diese Voraussetzungen mit Sicherheit nicht erfüllt, es sei denn, reiner Zufall spielt mit. Daher muß bei einem Selbstbaugerät der Wert des Gegenkopplungs-Widerstandes RG stets versuchsweise wie folgt ermittelt werden:

Kreischt oder pfeift der Verstärker auch beim Umpolen der Gegenkopplung, so ersetzt man zunächst den Widerstand RG durch ein Potentiometer, das etwa zehnmal hochohmiger als der vorgeschlagene Widerstand ist. Durch langsames und stufenweises Zurückdrehen des Potentiometers und gleichzeitiges versuchsweises Umpolen des Ausganges findet man rasch eine Polung, bei der die Lautstärke zurückgeht, ohne daß der Verstärker schwingt. Diese Polung behält man bei, denn sie ist die gewünschte.

Jetzt müssen wir allerdings wenigstens in groben Zügen messen. An den Eingang des Verstärkers wird ein Meßton gelegt, etwa von einer Meßschallplatte oder gar von einem Tongenerator. Der Ton muß klar und unverzerrt (nicht übersteuern!) im Lautsprecher zu hören sein. Man mißt seine Spannung mit einem Werkstatt-Voltmeter, das parallel zur Primärwicklung des Ausgangsübertragers liegt. Wenn man eine Tonspannung von vielleicht 120 Volt einstellt, ist mit Sicherheit noch keine Übersteuerung zu befürchten.

Durch Verkleinern des Potentiometers (= RG) muß man jetzt versuchen, die Ausgangsspannung möglichst weit herabzudrükken, ohne daß der Verstärker zu schwingen beginnt. Rückgang der Ausgangsspannung auf $^1/_3$ (im Vergleich zur Spannung bei

abgeschalteter Gegenkopplung) ist erwünscht; erreicht man sogar $^1/_5$, dann darf man sich schon gratulieren. In Grenzfällen, also kurz bevor Selbsterregung eintritt, kann man durch probeweises Parallelschalten von Kondensatoren zum Widerstand RG vielleicht noch die Stabilität ein wenig erhöhen.

Ganz tückisch ist Schwingen im Ultraschallbereich, nämlich deshalb, weil man es im angeschlossenen Lautsprecher nicht hört. Hier hilft das Voltmeter an der Primärwicklung des Ausgangsübertragers. Beim Abschalten (= Zudrehen des Lautstärkeeinstellers) der Tonspannungsquelle (= Meßschallplatte, Tongenerator) muß es auf Null zurückgehen. Hat man schließlich mit dem Potentiometer den günstigsten Widerstandswert ermittelt, so lötet man bei RG den entsprechenden Festwiderstand ein.

5.2 Chassis- und Gehäusekonstruktionen

Während bei der Konstruktion von Chassis und Gehäusen für Rundfunk- und Fernsehgeräte der Industrie-Formgestalter ein gewichtiges Wort spricht, gelten im Verstärkerbau noch immer reine Zweckmäßigkeits-Gesichtspunkte. Verstärker sind Gebrauchsgeräte, sie haben nicht den Ehrgeiz, als Zimmerschmuck zu wirken. Deshalb haben sich seit Jahrzehnten die wenigen klassischen Bauformen nach **Bild 94** erhalten, freilich mit zahllosen Abwandlungen, die aber immer wieder auf die angeführten Grundformen zurückgehen.

Als primitivste Bauform kennen wir alle die sogenannte Brettschaltung nach Bild 94 a, die sich für einfache Endstufen oder für andere Geräte eignet, die gar keine oder wenige Bedienungselemente aufweisen und bei denen es nicht auf Platzersparnis ankommt. Man hat nur eine einzige Fläche zum Anordnen der Bauteile zur Verfügung, nämlich die Brett-Oberseite. Zwar braucht man die Bezeichnung „Brett" nicht allzu wörtlich zu nehmen, denn häufig tritt an seine Stelle ein Stück Aluminium- oder Eisenblech, aber trotzdem ... Diese auch heute noch in allen Labors der Welt bewährte Anordnung ist nicht zu verachten, auch wenn das Material wirklich nur Holz ist. Vor allem kostet das Vergnügen fast nichts. Man schneidet sich ein 20-mm-Brett zurecht und klebt auf die Oberseite Aluminiumfolie, wie sie die Hausfrau neuerdings zum Grillen und Backen verwendet. Diese Folie

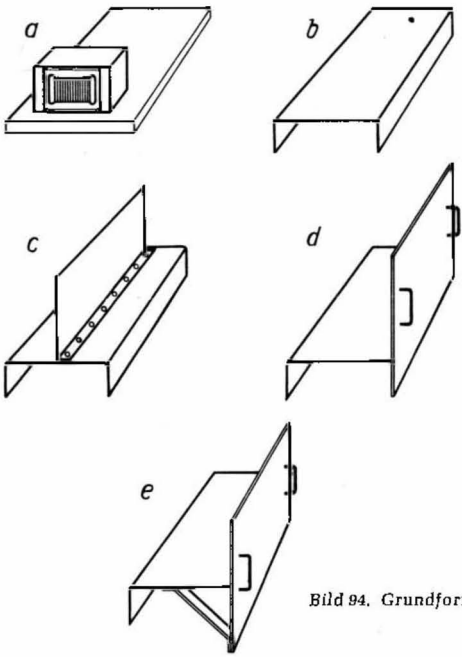


Bild 94. Grundformen von Verstärkerchassis

dient wie bei einem richtigen Aluminium-Chassis als gemeinsame Grundleitung. Bewährt sich das so labormäßig aufgebaute Gerät, dann biegt man sich aus Lochblech eine Haube, die über die Brettschaltung gestülpt und seitlich angeschraubt wird. Spritzlackiert man diese noch zuvor mit Autolack aus der Sprühdose, dann kann diese Primitivbauweise so sauber und ordentlich aussehen, daß man sich wirklich damit nicht zu schämen braucht.

Für umfangreichere Schaltungen verdient das bekannte U-Chassis nach Bild 94 b den Vorzug, weil jetzt bereits sechs Bauebenen zur Verfügung stehen. Oben finden Transformatoren, Übertrager, Drosseln und Röhren Platz, vorn die Bedienungselemente, hinten an der Schmalkante die Anschlüsse und unten die meisten Widerstände und Kondensatoren nebst der Verdrahtung. An den Innenseiten der abgewinkelten Längskanten ist Platz für viele Kleinteile, und quer eingezogene Blechstreifen (zur Ab-

schirmung brummempfindlicher Teile) schaffen weitere kleine Bauebenen.

Das gilt natürlich erst recht für eine Anordnung nach Bild 94 c, deren aufgeschraubtes Trennblech auf der Oberseite z. B. die Röhren von den Transformatoren trennt und das man bei Bedarf ebenfalls zum Anbringen von Kleinteilen mitbenutzen kann.

Eine weitere Montageebene ergibt sich, wenn das U-Blech nach Bild 94 d durch eine angeschraubte Frontplatte (vgl. Bild 83) ergänzt wird. Sie bietet Platz für Meßinstrumente, und außerdem kann die seitlich überstehende Platte zum Festschrauben des Verstärkers in Gestellen dienen. Diese Bauweise läßt sich auch nach Bild 94 e abwandeln, wenn man unter dem Chassis mehr Platz braucht.

Je mehr neue Montageebenen man durch Einziehen von Zwischenböden, Trennwänden und dergleichen schafft, um so mehr Einzelteile kann man bei guter Übersichtlichkeit auf kleinem Raum unterbringen. Man kommt dadurch fast zwangsläufig zum sogenannten *Baugruppenprinzip*. Hierunter versteht man das Zusammenfassen von zusammengehörigen Bauelementen zu einer mechanischen Einheit. Ein Beispiel ist der Zusammenbau von Netztransformator und Gleichrichterröhre mit den der Strom-

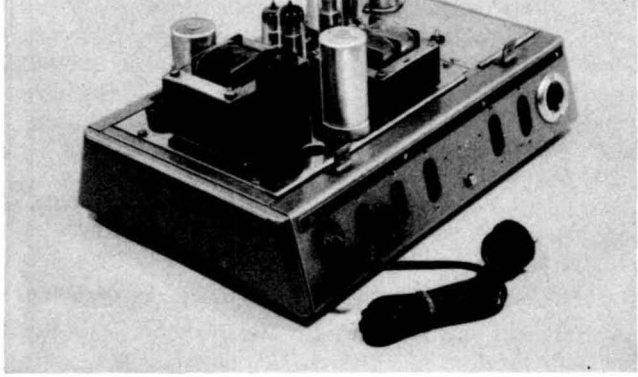


Bild 95. Draufsicht auf das Chassis eines Industrieverstärkers

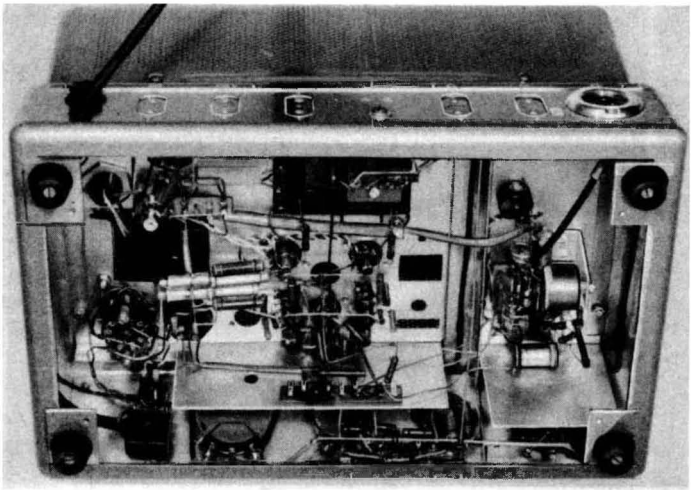


Bild 96. Unteransicht des Gerätes von Bild 95 (Telefunken)

versorgung dienenden Kondensatoren und Widerständen. Solche Baugruppen lassen sich dann außerhalb des Gerätes vorverdrahten, so daß bei geschicktem Entwurf in der Endmontage im Gerät nur noch die Baugruppen untereinander durch „*Kabelbäume*" zu verbinden sind. Kabelbäume bestehen aus Einzeldrähten, die gemeinsam geführt werden und durch Zusammenbinden mit Heftgarn oder durch Isolierschlauchüberzüge zu Mehrfachkabeln vereinigt sind. An den passenden Stellen kommen dann aus einem solchen Kabelbaum die erforderlichen Abzweigungen wie Baumäste heraus. Diese Verdrahtungsart, die aus der Fernmeldetechnik übernommen wurde, hat sich im modernen Verstärkerbau weitgehend durchgesetzt.

Beispiele für nach ähnlichen Gesichtspunkten aufgebaute Verstärker der Industrie zeigen die **Bilder 95** und **96.**

5.3 Gedruckte Schaltung oder konventionelle Verdrahtung?

Auch diese Frage läßt sich nicht allgemeingültig beantworten. Wer sich eine Ansicht bilden möchte, muß sich etwas tiefer in die Zusammenhänge hineindenken.

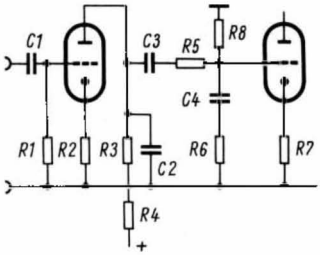
Erinnern wir uns zunächst einmal daran, was die Hauptvorzüge gedruckter Schaltungen sind. An der Spitze steht die absolute Gleichmäßigkeit in der Massenfertigung, dann folgen die Kostensenkung durch die maschinelle Bestückung mit Bauelementen und das automatische Löten im Tauchlötbad. Erst an dritter Stelle machen sich die geringen Abmessungen vorteilhaft bemerkbar.

Beim Bau eines Einzelstückes spielen die beiden zuerst genannten Gesichtspunkte überhaupt keine Rolle, im Gegenteil! Das Anfertigen der Druckplatine kostet viel mehr Zeit und Geld als eine biedere Handverdrahtung. Erst wenn besonders kleine Abmessungen gefordert werden, beginnt die gedruckte (oder geätzte) Schaltung interessant zu werden. Das dürften aber Ausnahmen sein, und wer sich dafür begeistert, wird sicher auch Freude am Entwurf und an der Herstellung haben. Nähere Angaben enthält Band 119/120 der Radio-Praktiker-Bücherei, „Gedruckte Schaltungen" von Hans Sutaner.

Für den Bau von Einzelstücken bewährt sich noch immer am besten das Zusammenfassen von Widerständen und Kleinkondensatoren auf Isolierstoffleisten. Bei vernünftiger Planung gelangt man dadurch zu Baugruppen, die man außerhalb des Gerätes bestückt und lötet und die man anschließend als Ganzes einbaut. Wer wirklich sorgfältig konstruiert hat, muß dann nur noch wenige und ganz kurze Verbindungen zu den Lötfahnen der Röhrenfassungen und zu den Potentiometern oder Anschlußbuchsen herstellen.

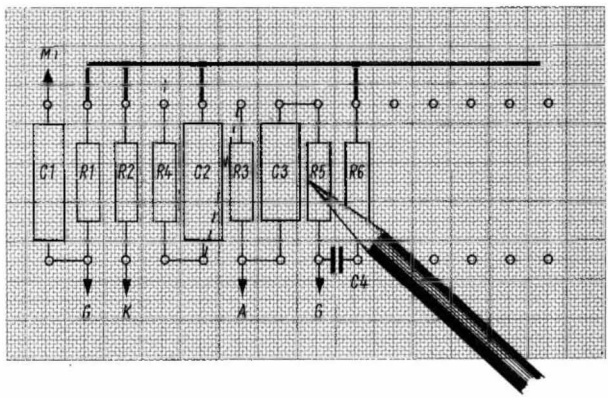
Dieses sorgfältige Konstruieren fällt einem aber nicht in den Schoß, und dennoch ist es keine „Geheimwissenschaft", wenn man sich einiger erprobter Kniffe bedient.

Am besten fertigt man sich zunächst ein normales Schaltbild (**Bild 97**) an und beziffert die Widerstände und Kondensatoren in ihrer natürlichen Reihenfolge. Anschließend werden die Bauelemente in eine Skizze übertragen, die in natürlicher Größe auf Millimeterpapier die Lötösenleiste wiedergibt (**Bild 98**). Beim Umzeichnen sollte man darauf achten, daß alle „heißen" Leitungen auf der einen und die kalten (Masse und Anodenspannung) auf der anderen Seite liegen. Außerdem lohnt es sich, die Papierschablone von Zeit zu Zeit in das bereits fertiggestellte Chas-



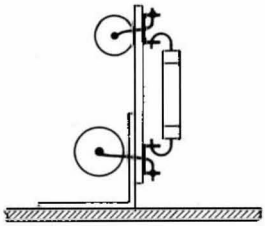
Links: Bild 97. Teilschaltbild eines Nf-Verstärkers

Unten: Bild 98. Original-Handskizze der Lötösenplatte, die nach Bild 97 entworfen wurde



sis zu halten. Dabei zeigt es sich sofort, ob die abgehenden Anschlüsse später genügend kurz ausfallen oder ob es vielleicht zweckmäßiger ist, beim Bestücken eine oder mehrere Lötösen zu überspringen.

Für die zweckmäßigste Anordnung der Isolierleisten gibt es viele Möglichkeiten. Man kann sie über oder unter dem Chassis stehend an Winkeln oder auf Abstandsstücken liegend befestigen (**Bild 99**) und sie ober- oder unterhalb kreuz und quer mit Bauelementen bestücken (**Bild 100**). Der Verfasser hat sich solche Isolierleisten jahrelang nach Maß angefertigt, und zwar aus 1,5-mm-Hartpapier, auf das im gewünschten Abstand Nietlötösen gesetzt wurden. Solche Ösen gibt es in jedem Versandhaus für Radioeinzelteile, und für zwei bis drei Mark (Preis nach Gewicht!) erhält man genug, um damit viele Jahre lang zu konstruieren.



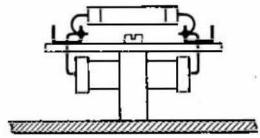


Bild 99. So werden Lötösenstreifen mit Schaltelementen bestückt

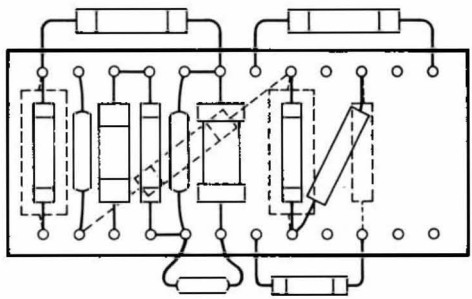


Bild 100. Auf kleinstem Raum lassen sich zahlreiche Bauelemente unterbringen

Inzwischen siegte die Bequemlichkeit. Heute begnügt man sich mit jenen etwa 12 mm breiten Leisten aus Superpertinax, bei denen die Ösen in 8 mm Abstand sitzen und die man billig als Meterware bekommt. Für eine Platte nach Bild 100 sind demzufolge zwei getrennte Leisten im gewünschten gegenseitigen Abstand erforderlich. Diese ursprünglich als Behelf (= Bequemlichkeit) angesehene Lösung hat sich im Lauf der Zeit sogar als sehr praktisch erwiesen, weil sie nämlich beim Auslöten von Bauelementen, die unterhalb der Isolierstoff-Ebene sitzen, noch bequemeres Hantieren erlaubt.

Sachverzeichnis

A

Abhörverstärker 82
Abschirmung 24, 31
Abschlußwiderstand 44
Abwärtsübertrager 31
Allstrom-Schaltung 120
Aufsprechverstärker 46
Ausgangsübertrager 27
Aussteuerungsmesser 76, 112

B

Baßanhebung 35, 91
Batteriebetrieb 25, 28, 96, 99
Bausteintechnik 9, 24, 54, 70
Bestückung 16
Brettschaltung 131
Brückengleichrichter 20, 25, 29
Brummen 24

C

Chassiskonstruktion 131

D

Dia-Vertonung 66
Diskussions-Anlage 37
Doppeltriode 17, 31, 54
Dynamik 11
Dynamikbegrenzer 59, 61

E

Eingangsspannung 10, 24
Eingitterröhre 16
Eisenloser Transistorverstärker 100, 102, 105
Emitterstufe 27
Endröhre 20
Entbrummer 25, 29
Entkopplung 20, 58, 69
Entzerrung 40, 43, 45, 86
Erdfreier Ausgang 54

F

Fernbedienung 36
Fotowiderstand 35, 59
Fotozelle 29
Frequenzbereich 14
Frequenzkorrektur 48, 75
Frequenzkurve 12

G

Gedruckte Schaltung 134
Gegenkopplung 16, 18, 20, 26, 45, 50, 52, 54, 64, 124, 127
Gehäusekonstruktion 131
Gehörrichtiger Lautstärkeeinsteller 82
Geschlossene Box 81
Geschwindigkeitsamplitude 40
Goldene Zahl 91

H

Hallverstärker 62
Hammond-Prinzip 63
Handverdrahtung 135
Hauptverstärker 24, 28
Heizwicklung 20
Höhenanhebung 40, 45, 53
Höhenbeschneidung 41
Hörkopf 48, 63

I

Impedanzwandler 42, 50
Intermodulation 13

K

Kapazitiver Innenwiderstand 41
Katodenstufe 34
Katodyneschaltung 95, 111, 124
Kinogong 34
Klangeinsteller 54, 69, 74, 81, 87, 89
Klirrfaktor 11
Knotenpunkt 69, 74, 75
Kollektor-Ruhestrom 98
Komplementär-Endstufe 105
Komplettverstärker 9
Kristallmikrofon 28
Kuhschwanz-Entzerrer 89

L

Ladekondensator 25
Lautsprecherverstärker 59, 80
Leitung, längere 27, 41, 53, 56, 75
Lötösenleiste 112, 136

M

Magnettonverstärker 44
Mehrgitterröhren 16
Mehrkanal-Schaltung 93, 116
Meßbuchse 112
Mikrofonverstärker 24
Mischverstärker 53, 107
Mittelanzapfung 21
Mischpult 66
Modulationsverstärker 96, 112
Montageebenen 133
Multiplay 48
Mu-Metall 24, 28

N

Netzteil 21
Nulleitung 124
Nutz-Störspannungsverhältnis 12

O

Oktave 14

P

Pegeleinsteller 27, 67
Pentode 16
Phasenumkehr 19, 111

Q

Quellenverstärker 8

R

Rauschen 11
Regiebaugruppe 70
Rumpelstörung 44

S

Saalregler 29, 35
Sammelschiene 69, 74
Schallplatten-Jockei 66
Schaltkapazität 16
Schirmgitter-Stabilisierung 108
Schneidkennlinie 40
Schreiberverstärker für Schallfolien 84
Selbstbaupraxis 127
Siebung 11, 26, 30
Silizium-Diode 20
Sprechkopf 50
Sprechleistung 8, 9, 14
Stereo-Mischpult 80
Stereoverstärker 102
Steuergerät 66, 71
Störgeräusch 11, 41
Stufenzahl 8
Summenverstärker 53, 69
Symmetrierung 111

T

Tiefenanhebung 35, 91
Tonabnehmerverstärker 40
Tonaufnahme 9
Tonaufzeichnung 9
Tonblende 87
Tonwiedergabe 9
Transistor 22, 42
Trennverstärker 53
Triode 19

U

U-Chassis 132
Überblendung 30
Übergangsfrequenz 40
Übersteuerung 59
Übertragungsverstärker 8
UKW-Schwingschutz 111

V

Verbraucherverstärker 8
Verbundkopf 52
Verstärkerstraße 8
Verstärkungsziffer 8, 10, 16
Verzerrungen 12
Vollverstärker 9
Vorröhre 20
Vorverstärker 25, 41

W

Wirkungsgrad 10, 82
Wortmeldetaste 37, 39

Z

Zeitverzögerung für Hall 62
Zellenspannung 30

Dezibel und Neper

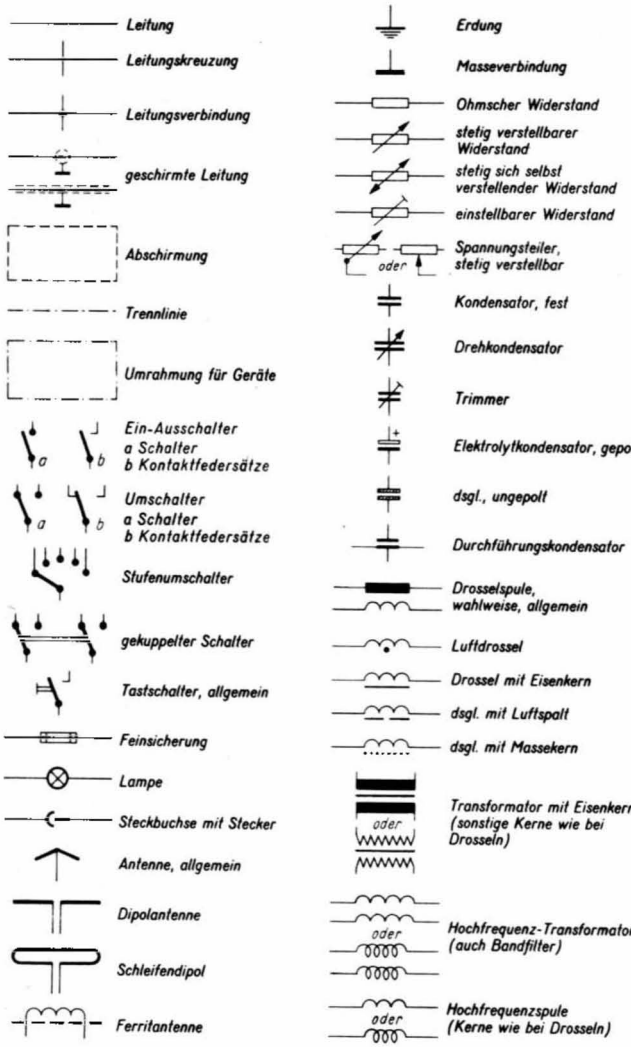
Dezibel-Tabelle

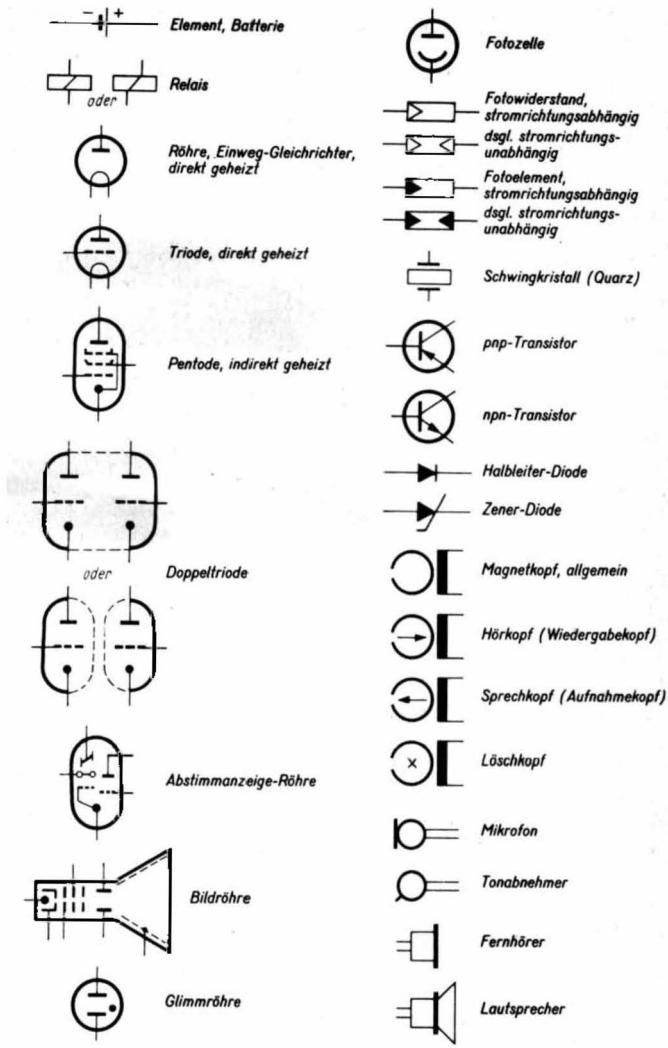
dB	Spannungsverhältnis	dB	Spannungsverhältnis
0,1	1,012	9,8	3,09
0,5	1,059	10,0	3,16
1,0	1,122	10,5	3,35
1,5	1,189	11,0	3,55
2,0	1,259	11,5	3,76
2,2	1,288	12,0	3,98
2,4	1,318	12,5	4,22
2,6	1,349	13,0	4,47
2,8	1,380	13,5	4,73
3,0	1,413	14,0	5,01
3,2	1,445	14,5	5,31
3,4	1,479	15,0	5,62
3,6	1,514	15,5	5,96
3,8	1,549	16,0	6,31
4,0	1,585	16,5	6,68
4,2	1,622	17,0	7,08
4,4	1,660	17,5	7,50
4,6	1,698	18,0	7,94
4,8	1,738	18,5	8,41
5,0	1,778	19,0	8,91
5,2	1,820	19,5	9,44
5,4	1,862	20	10,00
5,6	1,906	21	11,22
5,8	1,950	22	12,59
6,0	1,995	23	14,13
6,2	2,04	24	15,9
6,4	2,09	25	17,8
6,6	2,14	26	20,0
6,8	2,19	27	22,4
7,0	2,24	28	25,1
7,2	2,29	29	28,2
7,4	2,34	30	31,6
7,6	2,40	31	35,5
7,8	2,45	32	39,8
8,0	2,51	33	44,7
8,2	2,57	34	50,1
8,4	2,63	35	56,2
8,6	2,69	36	63,1
8,8	2,75	37	70,8
9,0	2,82	38	79,4
9,2	2,88	39	89,1
9,4	2,95	40	100,0
9,6	3,02		

Neper-Tabelle

Neper	Spannungsverhältnis	Neper	Spannungsverhältnis
0,01	1,01	1,30	3,67
0,05	1,05	1,35	3,86
0,10	1,11	1,40	4,05
0,20	1,22	1,45	4,26
0,25	1,28	1,50	4,48
0,27	1,31	1,55	4,71
0,30	1,35	1,60	4,95
0,32	1,38	1,65	5,21
0,35	1,42	1,70	5,47
0,37	1,45	1,75	5,76
0,40	1,49	1,80	6,05
0,42	1,52	1,85	6,36
0,45	1,57	1,90	6,68
0,47	1,60	1,95	7,03
0,50	1,65	2,0	7,39
0,52	1,68	2,1	8,2
0,55	1,73	2,2	9,0
0,57	1,77	2,3	10,0
0,60	1,82	2,4	11,0
0,62	1,86	2,5	12,2
0,65	1,92	2,6	13,5
0,67	1,95	2,7	14,9
0,70	2,01	2,8	16,4
0,72	2,05	2,9	18,2
0,75	2,12	3,0	20,1
0,77	2,16	3,1	22,2
0,80	2,23	3,2	24,5
0,82	2,27	3,3	27,1
0,85	2,34	3,4	30,0
0,87	2,39	3,5	33,1
0,90	2,46	3,6	36,6
0,92	2,51	3,7	40,5
0,95	2,59	3,8	44,7
0,97	2,64	3,9	49,4
1,00	2,72	4,0	54,6
1,05	2,86	4,1	60,3
1,10	3,00	4,2	66,7
1,15	3,16	4,3	73,7
1,20	3,32	4,4	81,5
1,25	3,49	4,5	90,0
		4,6	99,5

Die wichtigsten Schaltzeichen





Die vollständige Sammlung der Schaltzeichen enthält das DIN-Taschenbuch 7: Schaltzeichen und Schaltpläne für die Elektrotechnik.
(Beuth-Vertrieb, Berlin und Köln)